TUTORIAL SERIE DE LIBROS DE COLOR IEEE

CONEXIÓN A TIERRA DE SISTEMAS INDUSTRIALES Y COMERCIALES (GREEN BOOK)

Presenta: Fredy Villalta

Recommended IEEE Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems

GREEN BOOK

Power Systems Engineering Committee

IEEE Industry Applications Society

IEEE Std 142-1991

- Aterrizaje de los sistemas
- Sistemas aterrizados vrs. Sistemas aislados
- Cómo se aterrizan sistemas
- Equipo para aterrizar el neutro
- Conexión de bastidores y encerramientos al sistema de tierra
- Conexión del conductor a los electrodos
- Electricidad estática: generación, medición, prevención, drenaje
- Protección de estructuras contra las descargas eléctricas
- Obtención de conexión de resistencia baja a tierra
- Equipo electrónico sensible

INDICE

1. ATERRIZAJE DE SISTEMAS

2. ATERRIZAJE DE EQUIPO

3.ATERRIZAJE DE PROTECCION CONTRA CARGA ESTATICA Y DESCARGAS ELECTRICAS

4. CONEXIÓN A TIERRA

5. ATERRIZAJE DE EQUIPO ELECTRONICO SENSIBLE

1. ATERRIZAJE DE SISTEMAS

1.1 Introducción:

Debemos tomar la decisión de aterrizar o no un sistema. Es recomendable, aunque hay excepciones. Los métodos y criterios para decidir tienen sus propios propósitos.

Lo que aquí se diga se aplica a sistemas industriales de potencia que distribuyen y utilizan la potencia en medio y bajo voltaje, dentro de un área geográfica pequeña cubierta por una "utility"

Se toma en cuenta:

- Localización dentro del sistema de potencia
- Características individuales de los generadores
- Necesidades de los procesos de fabricación

1.2 Definiciones:

Aterrizado efectivamente: a través de impedancia suficientemente baja y que siempre se cumpla que $X_0 / X_1 < 3$ y que $R_0 / X_1 < 1$

Sistema aterrizado: por lo menos un conductor o punto se aterriza intencionalmente, sólidamente o a través de impedancia

Aterrizado: conectado a tierra o a algún cuerpo conductor grande que sirve en vez de tierra, no importa si es intencional o accidental

Aterrizado por resistencia alta: tiene una resistencia insertada a propósito para limitar la corriente de falla a tierra a 10 A ó menos. Cumple con el criterio de $R_0 \leq X_{C0}$ para limitar los sobrevoltajes transitorios debidos a fallas a tierra con arqueo

X_{C0} = reactancia capacitiva distribuida a tierra, por fase, del sistema
R_0 = resistencia de secuencia cero, por fase, del sistema

Aterrizado por resistencia baja: cumple el criterio de aterrizaje por resistencia alta con un valor bajo de resistencia. La resistencia se escoge para permitir la corriente de relevo que se desea.

Corriente de carga, por fase, (I_{C0}) = (V_{LN} / X_{C0}): que pasa en una fase del sistema para cargar la capacitancia distribuida a tierra, por fase, del sistema

R_0: resistencia de secuencia cero, por fase, del sistema

Aterrizado por reactancia: el elemento principal es inductancia

Aterrizado por resistencia: el elemento principal es resistencia

Resonancia: el comportamiento de un sistema físico (sistema eléctrico o circuito) a una excitación periódica, cuando la frecuencia de excitación (f) es igual a la frecuencia natural del sistema.

En serie, $X_L = X_C$ cuando $f = 1 / (2\pi \sqrt{LC})$
En paralelo, $1 / X_L = 1 / X_C$ cuando $f = 1 / (2\pi \sqrt{LC})$

R_n: resistencia conectada entre el neutro y tierra (resistencia alta se puede considerar que $R_0 = 3 R_N$

Aterrizado sólidamente: conectado directamente, a través de una conexión a tierra sin impedancia intencional

Carga estática: electricidad generada cuando dos sustancias distintas se ponen en contacto, por ejemplo, en bandas transportadoras

Pulso de "switcheo" (switching surge): onda transitoria de sobrevoltaje provocada por la operación de un dispositivo de switcheo que interrumpe una corriente de carga o de falla.

Sistema: el sistema de aterrizaje se forma con todas las conexiones de aterrizaje interconectadas, en un sistema de potencia específico, y que se define por su aislamiento de sistemas aterrizados adyacentes

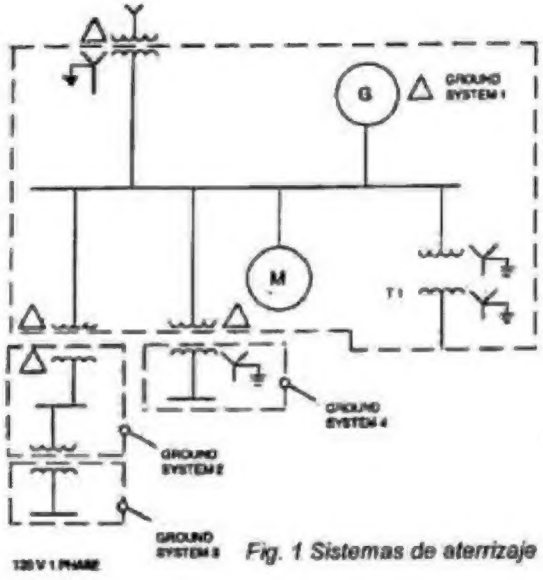


Fig. 1 Sistemas de aterrizaje

El aislamiento se da con los embobinados primario y secundario de un transformador acoplado sólo por el campo magnético.

La frontera del sistema está definida por la ausencia de una conexión física metálica o por una impedancia significativamente alta. (La FIG. 1 ilustra los límites y fronteras de los sistemas de aterrizaje).

Corriente de carga del sistema: es la corriente de carga capacitiva distribuida total de un sistema trifásico (3 V_{LN} /X_{C0})

Sistema trifásico 4 hilos: en donde el cuarto conductor se conecta al punto neutro de la fuente o al punto medio de una fase de una delta secundaria, y que se puede, o no, aterrizar.

Sistema trifásico 3 hilos: entre las tres parejas de conductores hay diferencias de potencial desplazadas en fase por un tercio de período

Sobrevoltaje transitorio: sobrevoltaje temporal de corta duración asociado con la operación de un dispositivo de switcheo, una falla, una descarga eléctrica o durante fallas a tierra con arqueo en sistemas no aterrizados.

Sistema no aterrizado: no hay conexión intencional a tierra, excepto a través de dispositivos indicadores o medidores de potencial.

1.3 Propósito del aterrizaje de sistemas:

Para controlar el voltaje a tierra (planeta o masa) dentro de límites predecibles.

También suministra trayectoria al paso de corriente que permite detectar una conexión no deseada entre los conductores del sistema y tierra y que puede provocar la operación de dispositivos automáticos para quitar la fuente de voltaje a los conductores que tienen esa conexión no deseada a tierra

El control del voltaje a tierra limita los esfuerzos de voltaje sobre el aislamiento de los conductores.

El control del voltaje permite reducir los peligros de choque a las personas que pueden tener contacto con los conductores “vivos”.

1.4 Métodos de aterrizaje del neutro de un sistema:

1.4.1 Introducción:

Hay dos categorías: - aterrizaje sólido

- aterrizaje por impedancia → Reactancia
- aterrizaje por impedancia → resistencia
- aterrizaje por impedancia → neutralizador

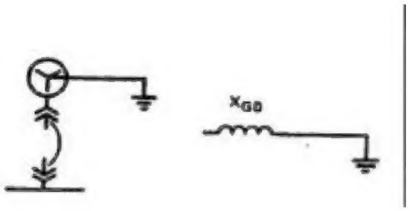
La FIG. 2 ilustra ejemplos de esos métodos de aterrizaje. Cada método recibe el nombre por la naturaleza del circuito externo que conecta el neutro a tierra. La impedancia del generado o transformador esta en serie con ese circuito externo. Se necesitan conceptos de componentes simétricas que se pueden encontrar en: Capítulo 2 de Beeman y Capítulo 3 del IEEE Brown Book

La capacidad de interrupción de los CB se puede afectar con el método de aterrizaje

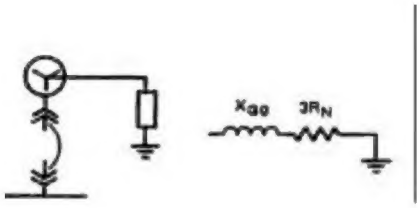
CIRCUITO	C0MPONENTES DE SECUENCIA CERO DEL CIRCUITO DEL NEUTRO

AISLADO

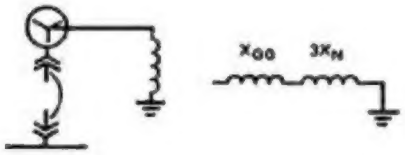
ATERRIZADO SOLIDAMENTE



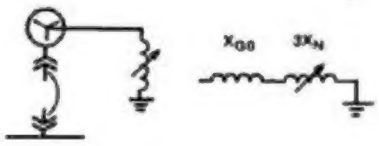
ATERRIZADO POR RESISTENCIA



ATERRIZADO POR REACTANCIA



NEUTRALIZADOR DE FALLA A TIERRA



X_{G0} = reactancia de secuencia cero del generador o transformador
X_N = reactancia del reactor de aterrizaje
R_N = resistencia del resistor de aterrizaje

Fig. 2 Circuito del neutro del sistema y diagramas equivalentes para sistemas no aterrizados y diversos tipos de sistemas con neutro aterrizado

1.4.2 Sistemas no aterrizados: aunque en realidad tienen la capacitancia distribuida a tierra, total, del sistema

- No hay disparo por la primera falla
- No se gasta en equipo de aterrizaje
- Los efectos de resonancia se dan cuando la falla a tierra incluye una reactancia inductiva igual a la capacitancia a tierra
- Se le puede poner un esquema de detección de tierra, estrella primaria con neutro aterrizado y delta interrumpida y cerrada con un relé de voltaje que opera un indicador o alarma. Para evitar resonancia se ponen resistencias de carga en el neutro primario o en el circuito secundario.

1.4.3 Aterrizaje por resistencia: no está expuesto a sobrevoltajes transitorios destructivos.

En 15 kv. y menos, esos sobrevoltajes no son peligrosos si la resistencia se encuentra entre

$$2X_0 \leq R_0 \leq X_{C0}$$

Las razones para limitar la corriente, aterrizando por resistencia, son una o más de las siguientes:

1) Reducir daños a interruptores, transformadores, cables, generadores

2) Reducir esfuerzos mecánicos en aparatos que llevan la I_{falla}

3) Reducir peligros de golpe al personal, por corrientes extraviadas de falla a tierra, en las trayectorias de retorno de tierra.

4) Reducir peligros del arco al personal en las cercanías de la falla

5) Reducir el "dip" momentáneo de voltaje producido por la falla

6) Asegurar control de los sobrevoltajes transitorios

$$R_{alta} \text{ --> } I_{falla} < 10 \text{ A} \qquad R_{baja} \text{ --> } 100 \text{ A} < I_{falla} < 1000 \text{ A}$$

1.4.4 Aterrizaje por reactancia: el grado de aterrizaje se describe con la magnitud de la corriente de falla.

Para prevenir sobrevoltajes transitorios serios, I_{falla} disponible debe estar entre 25% y, de preferencia el 60% de la corriente trifásica de falla ($X_0 < 10\ X_1$). No es una alternativa al aterrizaje por resistencia.

Algunos generadores se aterrizan con reactancia para limitar su corriente de falla a tierra a un valor igual al 100% de su corriente trifásica de falla.

1.4.5 Neutralizador de falla a tierra (Aterrizaje resonante): la reactancia se sintoniza con la corriente de carga del sistema para que la corriente de falla a tierra sea resistiva y de magnitud baja. Esa corriente está en fase con el voltaje de línea a neutro.

Si la corriente de falla está en aire (descarga en un aislador) se puede autoextinguir. Se usa arriba de 15 kv. , en líneas aéreas de transmisión o distribución

1.4.6 Aterrizaje sólido: el neutro se conecta directamente a la tierra de la subestación o a la Tierra.

Por la reactancia del generador o transformador en serie con el circuito del neutro, no da un circuito neutro de impedancia cero.

Si la reactancia de secuencia cero del sistema es mucho mayor que la reactancia de secuencia positiva del sistema, pueda ser que no se logre evitar los sobrevoltajes transitorios. Eso no ocurre en sistemas comerciales e industriales, donde los generadores tienen impedancia de secuencia cero bajas.

El transformador delta-estrella tiene impedancia de secuencia cero menor que la impedancia de secuencia positiva.

Sí se puede dar cuando hay varios generadores y/o transformadores en paralelo y sólo se aterriza uno.

También ocurre en distribución con líneas aéreas sin retorno de tierra metálico. En este caso, la corriente de falla a tierra retorna por Tierra, y aunque el neutro en la fuente y las partes no conductoras de la carga se aterricen con electrodos apropiados, el retorno incluye la impedancia de ambos electrodos, que puede ser significativa.

Otra fuente de impedancia de secuencia cero es un espaciamiento grande de línea a tierra en líneas aéreas.

Para asegurar los beneficios del aterrizaje sólido se debe determinar el grado de aterrizaje; una forma es comparando la corriente de falla a tierra con la corriente de falla trifásica. Los sistemas aterrizados efectivamente la tienen arriba del 60%.

Y están aterrizados efectivamente cuando $R_0 \leq X_1$ y $X_0 \leq 3\ X_1$, y, además, está condición se cumple en cualquier punto del sistema

X_1 es la reactancia de secuencia positiva del equivalente Thevenin del sistema completo, incluyendo las reactancias subtransitorias de todas las máquinas giratorias.

El uso de pararrayos para servicio con neutro aterrizado necesita que el sistema sea aterrizado efectivamente.

1.4.7 Obtención del neutro del sistema: lo mejor es usar, como fuentes, los generadores y transformadores con embobinados en estrella. La alternativa es usar transformadores de aterrizaje, conectados en zigzag, estrella-delta o conexión T.

El más común es el zigzag sin devanado secundario (La FIG. 3 ilustra las conexiones internas de los embobinados). Su impedancia a voltajes balanceados es alta; su impedancia a los voltajes de secuencia cero es baja. Divide la corriente de falla a tierra en 3 componentes iguales y en fase que circulan en los tres devanados del transformador de aterrizaje.

El transformador trifásico estrella-delta necesita la delta cerrada para dar trayectoria a la corriente de secuencia cero. La resistencia entre el neutro y tierra es para limitar la corriente de falla a tierra (FIG. 4)

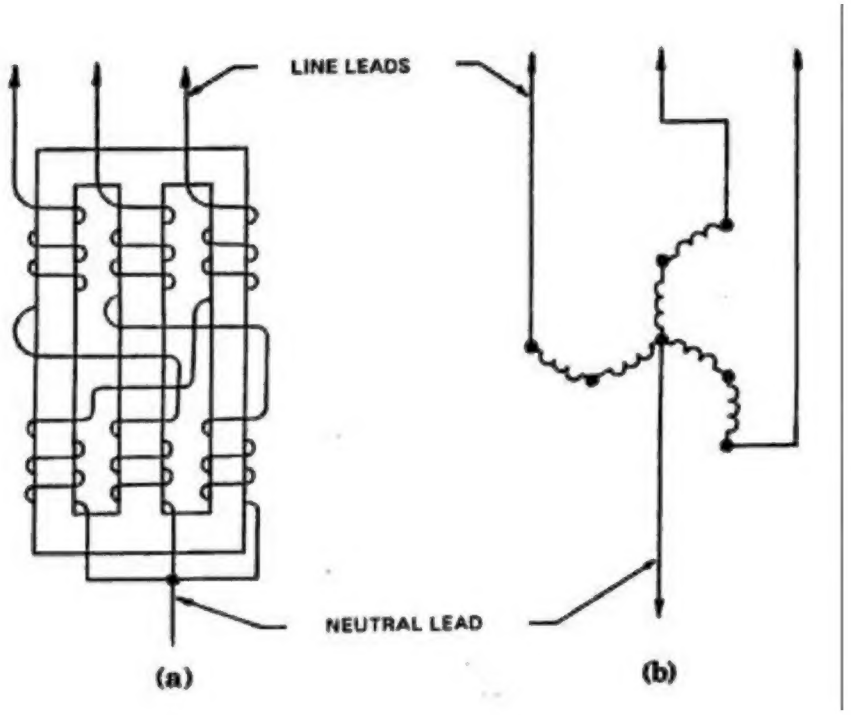


Fig. 3 a) Embobinados en el núcleo
b) Conexiones del transformador trifásico, de aterrizaje, zigzag

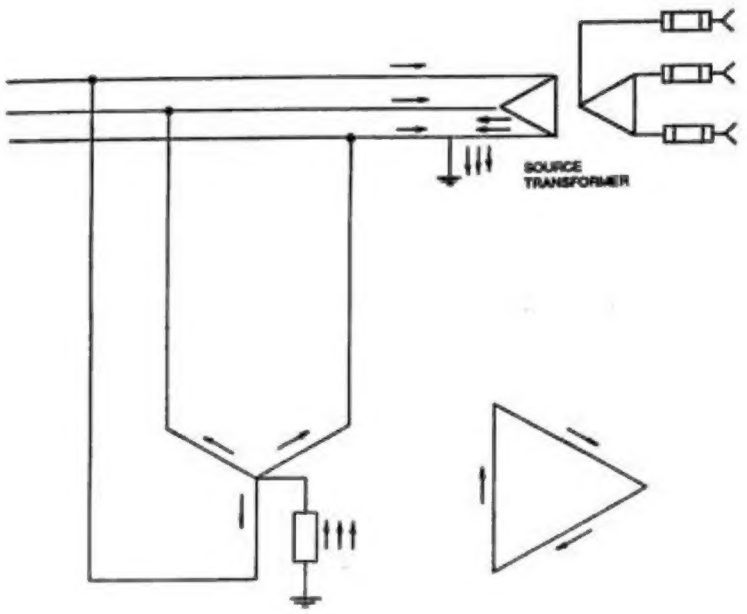


Fig. 4 Vectores que representan el flujo de corriente en un transformador estrella-delta usado como transformador de aterrizaje en falla de línea a tierra

Si el aterrizaje es por resistencia alta, es más práctico y económico insertar una resistencia limitadora en la conexión delta secundaria.

Se usan tres transformadores clase distribución con el neutro primario conectado directamente a tierra. Los embobinados de la estrella se especifican para el voltaje de línea a línea.

La capacidad de un banco de aterrizaje es voltaje de línea a neutro por corriente nominal en el neutro. Esa corriente en el neutro estará sólo entre 10 segundos a 1 minuto, razón por la cual los transformadores son más pequeños

Conviene que se conecte directamente en la barra, sin CB o fusibles, para que no quede fuera; en tal caso se considera parte de la barra.

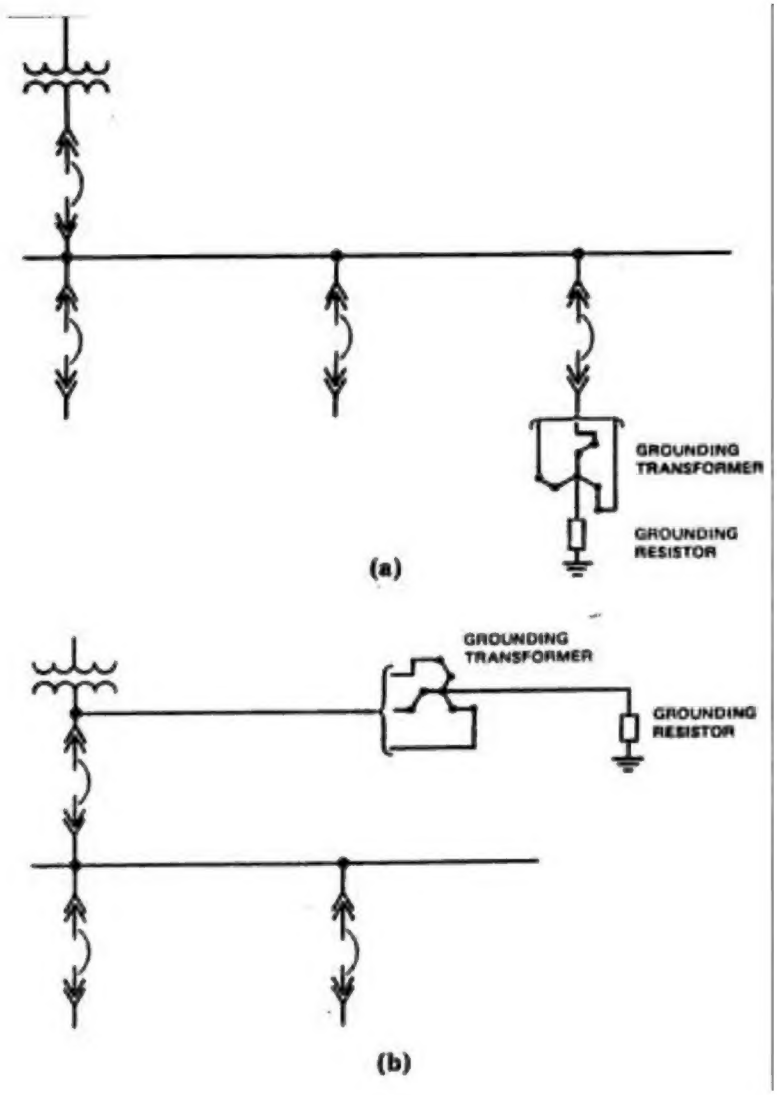


Fig. 5 Métodos de conexión de un transformador de aterrizaje, a un sistema de potencia conectado en delta o no aterrizado para formar el neutro del sistema aterrizado

1.5 Aterrizaje en puntos distintos del neutro del sistema

1.5.1 Esquina de un sistema delta:

Se tienen algunas ventajas

1) Es el más barato para convertir un sistema no aterrizado

2) Se necesitan tres protecciones de sobrecarga (NEC 430-37)

3) Las fallas a tierra en el circuito de control no arrancan ni paran el motor

4) Hay altas probabilidades de sostener un arco para 480 V o más, fase a fase, en extensiones de circuitos monofásicos, sin llegar a niveles de falla trifásica.

5) Controla efectivamente los transitorios y sobrevoltajes; pero puede existir un máximo de 1.73 veces el voltaje normal de fase a neutro entre dos conductores y tierra.

6) Una falla de fase a tierra se detecta y encuentra con facilidad

Las desventajas son:

1) Incapacidad de servir voltajes para cargas de alumbrado y potencia

2) Se necesita identificar positivamente, en toda la instalación, la fase aterrizada para evitar la conexión de medidores, fusibles, instrumentos y relés.

3) Mayor voltaje de línea a neutro en dos fases

4) Posibilidad de exceder la capacidad interruptiva de CB porque para una falla a tierra se puede exceder la corriente de falla trifásica

1.5.2 Una fase del sistema delta aterrizada en el punto medio: cuando se tiene mucha carga monofásica y poca carga trifásica.

No se recomienda para voltajes mayores de 240 V.

Ventajas:

1) El costo inicial es casi el mismo que en sistemas aterrizados sólidamente

2) Disparo rápido para fallas de fase a tierra

3) Se controla efectivamente, a niveles seguros, los sobrevoltajes

Desventajas:

1) Peligro de choques con la fase a 1.73 veces el voltaje en las otras

2) Se necesita plena identificación de esa fase para no conectar cargas de 120 V en esa fase

3) Serios destellos en fallas de fase a tierra por los niveles de falla altos

4) El costo de mantenimiento es un poco mayor que en sistemas con neutro aterrizado

5) Sobre 240 voltios tiene pocos usos

1.6 Localización de puntos de aterrizaje del sistema:

1.6.1 Selección: El sistema se ha definido como "aislado de sistemas de aterrizaje adyacentes". El aislamiento lo dan los embobinados del transformador

Los bancos YΔ y ΔY bloquean el flujo de corrientes de secuencia cero.

El punto de tierra del sistema debe estar en la fuente de potencia.

No se recomienda el concepto arcaico de aterrizar en las cargas. El NEC así lo reconoce

1.6.2 Fuente de potencia sencilla: en el neutro de la fuente como se muestra en la FIG 6.

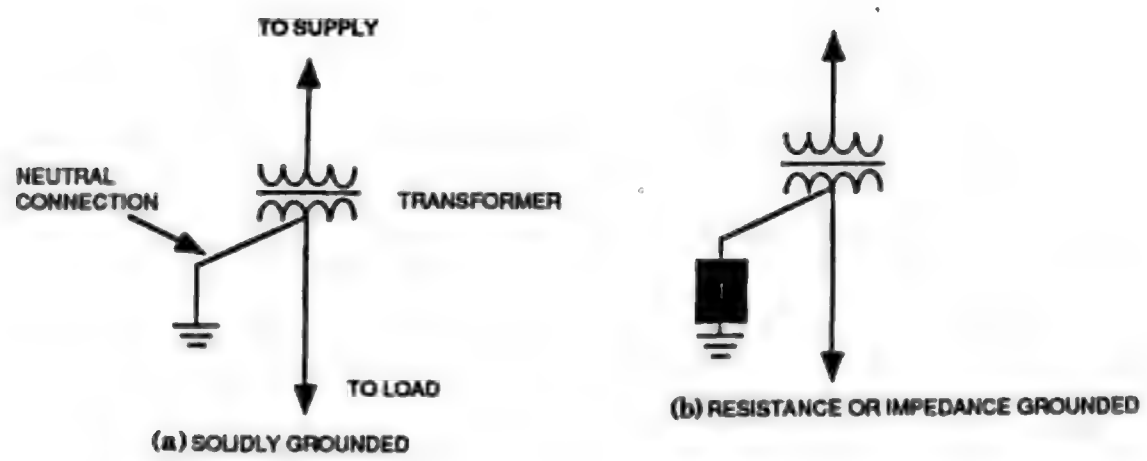


Fig. 6 Aterrizaje para sistemas con una sola fuente de potencia

1.6.3 Múltiple fuente de potencia: se puede lograr de dos modos:

1) Cada fuente aterrizada (FIG. 7)

2) Cada fuente conectada a una barra neutro común (FIG. 8)

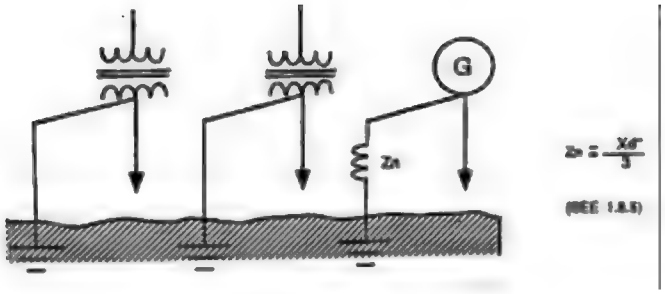
En sistemas aterrizados sólidamente, como en FIG. 7a

En sistemas aterrizados por impedancia, como en FIG. 7b

Si las fuentes están cercanas, como en FIG. 8a

Si la corriente total de falla se eleva a valores entre 1,000 a 4,000 A, como en FIG. 8b

(a) Aterrizado sólidamente



(b) Aterrizado con R ó Z

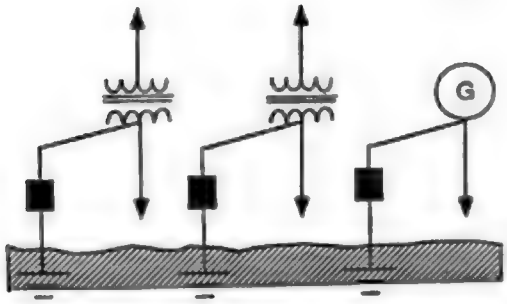
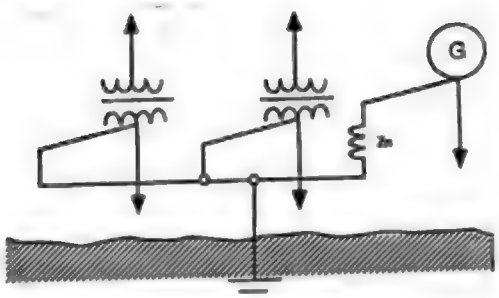
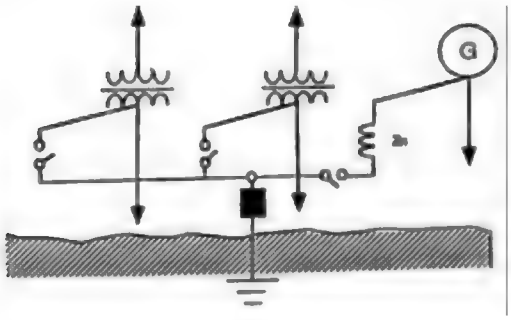


Fig. 7 Aterrizaje de sistemas con varias fuentes de potencia (Método 1)

(a) Aterrizado sólidamente



(b) Aterrizado con R ó Z con interruptor en el neutro.



Nota: se necesita procedimiento para prevenir "switcheo" del neutro con carga

Fig. 8 Aterrizaje de sistemas con varias fuentes de potencia (Método 2)

1.6.4 Creación de corrientes y potenciales extraviados (stray): si un conductor que lleva corriente, aunque nominalmente esté a potencial de tierra, se conecta a tierra en más de un punto, parte de su corriente fluirá por el planeta Tierra porque estarán en paralelo.

La mayor cantidad de caída de potencial en Tierra ocurre en las cercanías del electrodo de aterrizaje.

Cualquier conductor de aterrizaje conectado a ese mismo electrodo tendrá ese potencial; 0.5 V ya puede afectar.

250-24 del NEC recomienda conectar el neutro en cada entrada a los edificios. El NEC ha corregido con la excepción No. 2, si se lleva un conductor separado (distinto del neutro) para aterrizaje de equipos.

También se debe revisar la creación de multiaterrizaje por fallas en el aislamiento de los conductores neutro de los circuitos derivados.

Se debe reducir la corriente en el neutro, balanceando las cargas.

Se debe evitar la conexión de cargas con corrientes irregulares, como motores, entre línea y neutro.

Se debe evitar que los neutros primario y secundario se unan, se ha comprobado que hay diferencia de potencial entre neutro primario y Tierra, que en tal caso se estaría pasando al neutro secundario.

El efecto se reduce aumentando la efectividad de la conexión a tierra de la entrada de servicio y separándola alguna distancia.

1.6.5 Localizaciones de aterrizaje especificadas por el NEC: son los que el NEC recomienda o permite.

En 50 a 1,000 V, en la entrada de servicio, entre el neutro que llega y la salida hacia la carga, y si el transformador es externo, también, en un punto externo al edificio.

Si se tiene varios edificios, se hace una conexión a un sistema de aterrizaje en la entrada de servicio de cada edificio, pero se puede evitar si se lleva un conductor de aterrizaje de equipos junto a los conductores de carga.

Para circuitos de 240 V o menos, el código permite usar el conductor aterrizado para aterrizar los bastidores de cocinas, hornos, secadoras de ropa. Pero lo mejor es llevar un conductor de aterrizaje separado para esas estructuras, distinto del neutro, eso recomienda esta norma.

Las conexiones de aterrizaje no se deben colocar o conectar si hay posibilidades de que circulen corrientes en los conductores de aterrizaje

En sistemas sobre 1,000 V se usa el neutro derivado de un transformador.

En sistemas de alto voltaje se puede tener conexiones múltiples del neutro a tierra cuando los conductores son aéreos o cuando están todos enterrados con el conductor neutro.

1.6.6 Supresión del ruido del "common-mode" (modo común): cuando todos los conductores de un sistema de señales o de potencia tienen una diferencia de potencial idéntica con respecto a otro de referencia, ese potencial se conoce como voltaje o señal de "common-mode".

Si es indeseable se le llama "noise" o ruido. Las otras referencias son el bastidor del equipo y tierra, ambas pueden estar al mismo potencial.

Los equipos electrónicos son susceptibles a este ruido, porque se pueden afectar sus señales digitales o analógicas.

Este ruido aparece cuando existe diferencia de potencial entre la tierra del sistema de potencia y la tierra de referencia del equipo usuario porque hay acoplamiento capacitivo o resistivo entre la circuitería y su bastidor.

La diferencia de potencial aparece cuando fluye una corriente en el conductor de aterrizaje del equipo o en la tierra, entre el bastidor del equipo y el aterrizaje de la fuente de potencia.

El planeta Tierra tiene "stray currents" de diferentes fuentes.

El bastidor del equipo estará al mismo potencial de tierra si su conductor de aterrizaje tiene impedancia baja y se conecta al mismo punto de aterrizaje del transformador del sistema de potencia, éste se llama "single point ground" (punto único a tierra). Esto lo permite el NEC, Sec. 250-74, Excepción 4.

No se debe colocar un electrodo separado físicamente, viola el Artículo 250 del NEC, las corrientes de falla grandes pueden elevar el potencial del sistema o estructura a cientos o miles de voltios.

1.6.7 Limitación de los potenciales de tierra transferidos: este término se refiere al voltaje a Tierra de los sistemas de aterrizaje que aparecerán en los conductores como resultado que el electrodo de aterrizaje de la fuente del sistema se suba sobre el potencial normal de Tierra

Una causa son las corrientes de falla que retornan a sus fuentes a través de Tierra.

Por ejemplo, una falla a la red de tierra de una subestación que no está conectada a la tierra de la fuente del sistema, si la tierra del secundario sí está conectada, habrá un voltaje adicional entre línea y tierra.

Los circuitos de control y de teléfono son vulnerables a estos voltajes

Los potenciales transferidos se reducirán si la impedancia a tierra se reduce al mínimo

En el extremo se usan transformadores de aislamiento, reactores de neutralización o enlaces ópticos.

Otra forma es llevar los conductores de aterrizaje del equipo y el conductor aterrizado.

El equipo electrónico sensible sufre con esos voltajes de "common-mode".

Los requisitos del código no son suficientes porque sus reglas son para proteger personas y los equipos sensibles sufren daños con voltajes pequeños (más de 0.5 V), provocados también por otros fenómenos.

1.7 (Reservado para uso futuro)

1.8 Aterrizaje de generadores industriales

1.8.1 Características de los generadores: los generadores tienen características diferentes a los transformadores, las otras fuentes de potencia. Tiene poca habilidad soportar efectos de calentamiento y de fuerzas mecánicas de cortocircuito.

El generador soporta cortocircuitos de 10 p.u., en tanto que el transformador soporta 25 p.u.

El generador soporta 25% de los efectos de calentamiento de esa corriente comparado con el 100% del transformador. Si las corrientes son desbalanceadas, se reduce al 10%.

Las 3 reactancias de secuencia del generador no son iguales.

La reactancia de secuencia cero tiene el valor más bajo

La reactancia de secuencia positiva varía en función del tiempo

Si el neutro está aterrizado sólidamente, tiene corriente de falla a tierra mayor que la corriente de falla trifásica.

El límite de la capacidad térmica de corriente de secuencia negativa es $I^2 t = 40$

Con el neutro aterrizado sólidamente, la corriente de falla a tierra de estado estable es 8 veces la corriente de plena carga cuando la corriente de falla trifásica es 3 veces la corriente de plena carga por el contenido de secuencia negativa de la corriente de falla a tierra.

El BIL es menor. Las fallas internas a tierra producen corrientes de falla grandes que pueden dañas las láminas.

1.8.2 Generadores solos: Si está especificado para servicio aterrizado sólidamente, su neutro se conecta directamente al conductor aterrizado del circuito.

Si es un generador estándar, se debe conectar un reactor entre el neutro y el conductor aterrizado del circuito para limitar la corriente de falla a tierra momentánea a un valor no mayor que la corriente de falla trifásica momentánea.

Cuando $3i_0 = i_d"$ el valor del reactor del neutro debe ser:

$$\mathbf{X_N = (1/3)\ (\ 2X_d - X_2 - X_0\ )}$$

$3i_0$ =corriente de falla a tierra = $3 / (X_d" + X_2 + X_0 + 3 X_N)$
id = corriente de falla trifásica subtransitoria = $1 / X_d"$
$X_d"$ = reactancia subtransitoria del generador
X_2 = reactancia de secuencia negativa del generador
X_0 = reactancia de secuencia cero del generador

No se usa resistencia, se necesitaría un valor muy grande porque está en cuadratura con la reactancia del generador.

Si el lado estrella de un generador delta-estrella se conecta a un generador configurado para servicio de 4 hilos, el generador se debe diseñar con un devanado con 2/3 de paso.

Este transformador actuará como un cortocircuito para las corrientes de tercera armónica y si no se cancela el voltaje de tercera armónica, la corriente resultante puede afectar adversamente el relevo de falla a tierra y la capacidad del generador.

1.8.3 Generadores en paralelo en sistemas aislados: nos referimos a los conectados en paralelo al mismo bus. Los conectados en paralelo a través de transformadores se consideran en paralelo a fuentes separadas

El análisis es como el que hicimos en 1.8.1, excepto por la posibilidad de que circule una corriente de tercera armónica entre generadores aterrizados sólidamente, si alguno no tiene devanados con paso de 2/3.

Si tienen diseños idénticos no habrá corriente significativa si sus salidas de potencia y de corriente reactiva son idénticas.

Si los diseños no son idénticos, habrá corriente de tercera armónica.

Si operan con cargas desiguales habrá corriente de tercera armónica

Esas corriente se limitan aterrizando con resistencia alta

La corriente de tercera armónica se reduce a valores aceptables si se aterriza con resistencia baja, con valores que no excedan el 25% de la capacidad nominal del generador, aún en el caso de generadores diferentes; sin embargo, se puede tener problemas con la coordinación de relés por la variación de la corriente de falla a tierra.

A veces se aterriza sólo un generador para limitar la corriente de falla a tierra o la circulación de corriente de tercera armónica, sólo se debe revisar que el generador aterrizado soporte esa corriente de falla y, además, se debe prever algunos posibles errores de operación.

1.8.4 Generadores como fuentes alternas separadas: nos referimos a los generadores de emergencia y "standby" que se conectan a las cargas con interruptores de transferencia evitando la operación en paralelo con la fuente normal.

En sistemas de 3 hilos se consideran como fuentes separadas, el generador se aterriza como hemos recomendado en 1.8.2 y 1.8.3

En 4 hilos, puede fluir una corriente en el interruptor de transferencia de 3 polos; puede haber errores en los relés de falla a tierra. El NEC no pide el aterrizaje del neutro del generador si está conectado al neutro del sistema; pero no se puede reparar o probar el sistema si el generador está funcionando.

Con interruptor de transferencia de 4 polos no se tienen esos problemas.

1.8.5 Generadores en paralelo con otras fuentes: nos referimos a generadores conectados a transformadores que están, o pueden estar, conectados a otras fuentes de potencia. Como la consideración primaria es el aterrizaje del generador, las decisiones dependen de la necesidad de dar el aterrizaje deseado en el otro lado del transformador, cuando las otras fuentes de generación pueden estar desconectadas.

El transformador delta-estrella, con la estrella del lado del generador da la ventaja de suministrar el aterrizaje del neutro, sólido o con impedancia, a la barra de alimentador del generador, cuando el generador no está conectado. Su desventaja es que no da aterrizaje al sistema conectado en el lado delta del transformador.

Se presenta un peligro si los neutros del generador y transformador están aterrizados sólidamente.

El embobinado estrella con una delta primaria es un cortocircuito para cualquier corriente de tercera armónica producida por el generador.

La capacidad de falla a tierra en el bus deberá ser mayor que la suma aritmética de las corrientes de falla alimentadas por el generador y transformador cuando cada uno está conectado al bus independientemente.

La corriente de falla en el generador excederá el valor que se da cuando generador no está en paralelo.

Las corrientes de falla se deben calcular con técnicas de componentes simétricas, en vez de la simple suma de admitancias de las fuentes generador y transformador.

El generador especificado para servicio aterrizado está capacitado para corriente de falla a tierra que fluye cuando está solo.

Se puede usar reactor en el neutro para limitar la corriente de falla atierra, pero no se limitará la corriente de tercera armónica a valores aceptables.

Se necesita suprimir la tercera armónica para facilitar la operación del relevo de falla a tierra.

Si la delta está conectada al bus del generador, el aterrizaje del neutro se obtiene para el sistema en el otro lado del transformador; pero, el bus del generador debe estar aislado hasta que el generador se conecte.

Si se coloca algún banco de aterrizaje en el bus, el generador se puede aterrizar por resistencia alta.

El banco YY da aterrizaje al lado opuesto a la fuente. La desventaja es que la corriente de secuencia cero puede salir de la fuente, así, el requisito de aterrizaje del sistema, en el otro lado del transformador, determinará el aterrizaje del generador.

Si se usa un terciario en delta, suministrará la corriente de secuencia cero y el generador se puede aterrizar sin atender las necesidades de aterrizaje del sistema, en el otro lado del transformador.

1.9 Aterrizaje de sistema para UPS:

1.9.1 Generalidades: es importante cuando alimenta cargas críticas de computadoras. Veremos algunos esquemas, en ellos, el "conductor aterrizado" es parte del circuito que lleva corriente. Nos referimos al conductor (generalmente el neutro) que se conecta a tierra intencionalmente.

El conductor de aterrizaje no es parte del circuito que lleva corriente.

Conductor de aterrizaje se refiere al conductor(s) que conecta(n) a todas las partes metálicas expuestas de un dispositivo, en primera instancia por seguridad y en segunda instancia por comportamiento.

1.9.2 Requisitos significativos del NEC:

1) Fuente derivada separadamente (NEC 250-5(d)): sistema de alambres cuya potencia se deriva de un generador, transformador o embobinados convertidores y no tiene conexión eléctrica directa, incluyendo el conductor del circuito aterrizado conectado sólidamente, para alimentar conductores de otro sistema (aterrizado)

2) Requisitos de tierra del NEC: es requisito del NEC que el conductor aterrizado del circuito (generalmente el neutro), de una fuente derivada separadamente, se interconecte en su fuente con el conductor de aterrizaje de seguridad y a un conductor de electrodo de aterrizaje local que está conectado al aterrizaje efectivo más cercano:

(1) acero estructural,
(2) tuberías de agua y
(3) electrodos de aterrizaje fabricados (conexión a Tierra)

3) Previsiones específicas del NEC: prohibe conectar el conductor aterrizado (neutro) al conductor de aterrizaje en más de un punto, porque se dividirían la corriente entre ellos, en el tramo que quedaría en paralelo. Más que por seguridad, afecta al sistema de protección.

4) Clasificación de UPS: el más común tiene un inversor de salida conectado en estrella y a menudo necesitan puentear la entrada para alimentarse de una fuente conectada en estrella. La parte inversor del UPS es una fuente derivada separadamente, en que la entrada al rectificador/cargador está aislada eléctricamente, de la salida del inversor; sin embargo, como el neutro de entrada está directamente conectado al neutro de la salida del inversor, el UPS tiene un sistema que se puede o no, considerar como un sistema derivado separadamente, dependerá del arreglo de ese puente del neutro de la entrada.

Usaremos este UPS como ejemplo.

1.9.3 Esquemas de aterrizaje:

1.9.3.1 Configuración 1: módulo de UPS sencillo, puente no aislado, servicio estrella aterrizada (FIG. 9), el Centro de Distribución de Potencia no tiene transformador de aislamiento. El neutro Conectado al conductor de aterrizaje, en el equipo de la entrada de servicio, entra en el módulo del UPS.

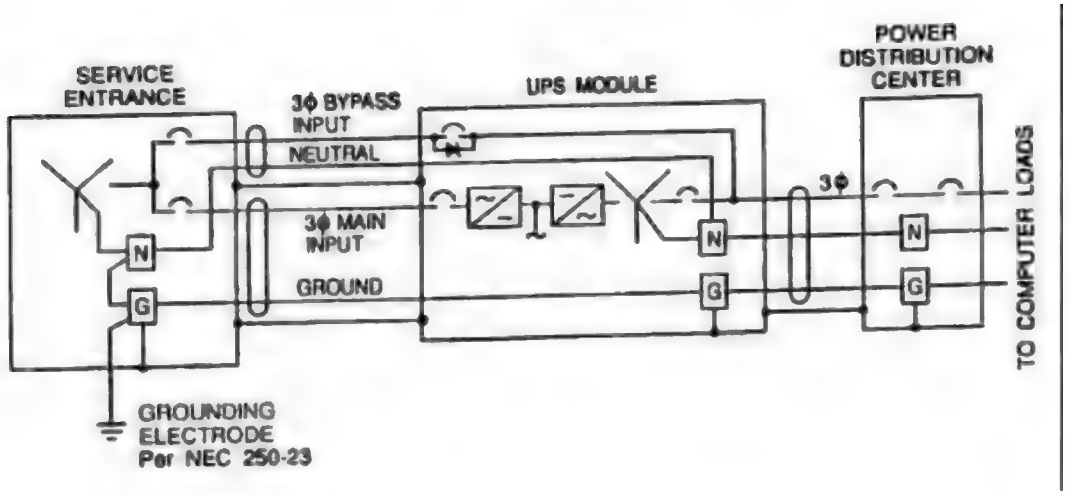


Fig. 9 Configuración 1

1.9.3.1.1 Arreglo de los conductores aterrizado/de aterrizaje: según el NEC, el UPS no es una fuente derivada separadamente. En este sistema:

1) el neutro del UPS no se debería conectar al conductor de aterrizaje del equipo, y

(2) no se debe instalar un conductor a un electrodo de aterrizaje local

1.9.3.1.2 Características/comportamiento: este arreglo es típico para entrada de 208 V y salida de 208 V, no da aislamiento o atenuación de ruido del "common mode" para cargas sensibles.

Una falla a tierra del inversor puede afectar adversamente el relé de falla a tierra, en la entrada de servicio. Realmente, el inversor no alimentará corriente de falla a tierra porque el interruptor estático hará la transferencia por la baja de voltaje debida a la falla.

1.9.3.2 Configuración 2: módulo de UPS sencillo, puente aislado. En esta configuración (FIG. 10), se usa un transformador puente para alimentar el puente en la entrada del módulo del UPS.

El transformador puente y el módulo del UPS constituyen, juntos, un sistema derivado separadamente, ya que no hay conexión eléctrica directa entre los conductores del circuito de entrada (entrada de servicio) y los conductores del circuito de salida.

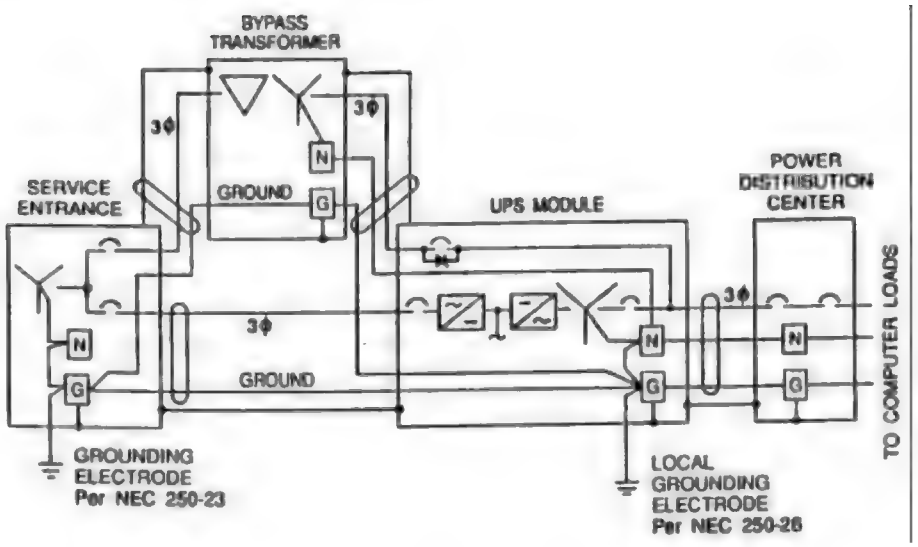


Fig. 10 Configuración 2

1.9.3.2.1 Arreglo de los conductores aterrizado/de aterrizaje: el neutro del módulo del UPS se debe unir al conductor de aterrizaje del equipo y se debe instalar un electrodo de aterrizaje local del módulo. En este caso particular, la unión del neutro al conductor de aterrizaje se puede hacer en el transformador puente o en el módulo del UPS (éste está más cerca de la carga). El transformador puente funciona como aislamiento y como transformador reductor.

1.9.3.2.2 Características/Comportamiento: se logra el aislamiento de la entrada, se obtiene la atenuación del ruido del "common-mode" para las cargas sensibles, si el UPS y el transformador puente están eléctricamente cerca (15 metros o menos) del Centro de Distribución de Potencia y de las cargas sensibles.

1.9.3.3 Configuración 3: módulo de UPS sencillo, puente no aislado, Centro de Distribución aislado, (FIG. 11). La entrada principal del módulo del UPS y el puente de entrada están conectados a un servicio en estrella aterrizada, igual que en la Configuración 1.

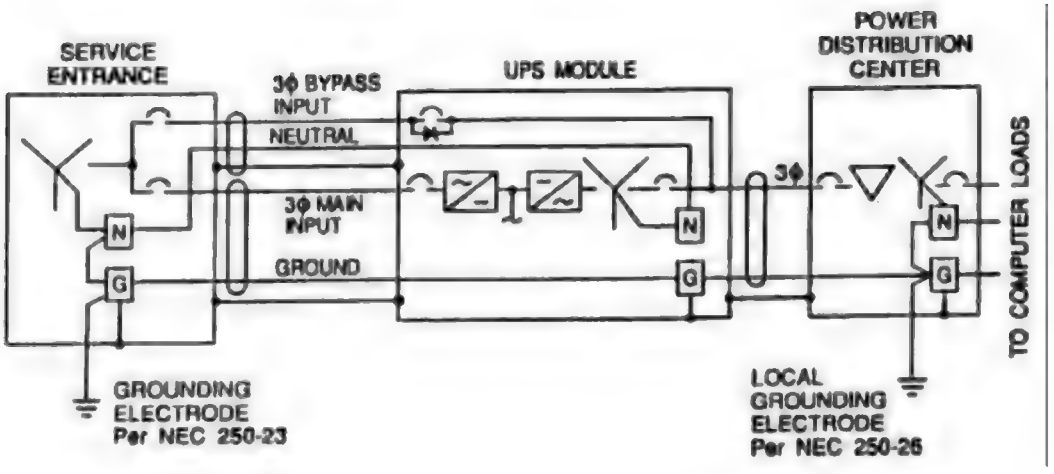


Fig. 11 Configuración 3

1.9.3.3.1 Arreglo de los conductores aterrizado/de aterrizaje: el módulo del UPS no se considera fuente derivada separadamente porque su neutro está conectado al conductor de aterrizaje en la entrada de servicio y está conectado sólidamente al neutro de salida del módulo del UPS.

El neutro del UPS no se debe conectar al conductor de aterrizaje del equipo en el módulo del UPS. Sin embargo, el Centro de Distribución de Potencia tiene un transformador de aislamiento y se considera como fuente derivada separadamente; su neutro se debe unir al conductor de aterrizaje del equipo y a un electrodo de aterrizaje local.

1.9.3.3.2 Características/Comportamiento: reste arreglo se puede aplicar en módulos de 208/208 V y de 480/480 V, la reducción a 208 se hace en el Centro de Distribución de Potencia, la atenuación del "common-mode" es mejor que en las configuraciones anteriores.

1.9.3.4 Configuración 4: módulo de UPS sencillo, puente de 3 hilos, Centro de Distribución aislado, Servicio en estrella aterrizada (FIG. 14). Es similar a la 3, excepto porque el neutro de la entrada de servicio no se incluye en el alimentador de potencia.

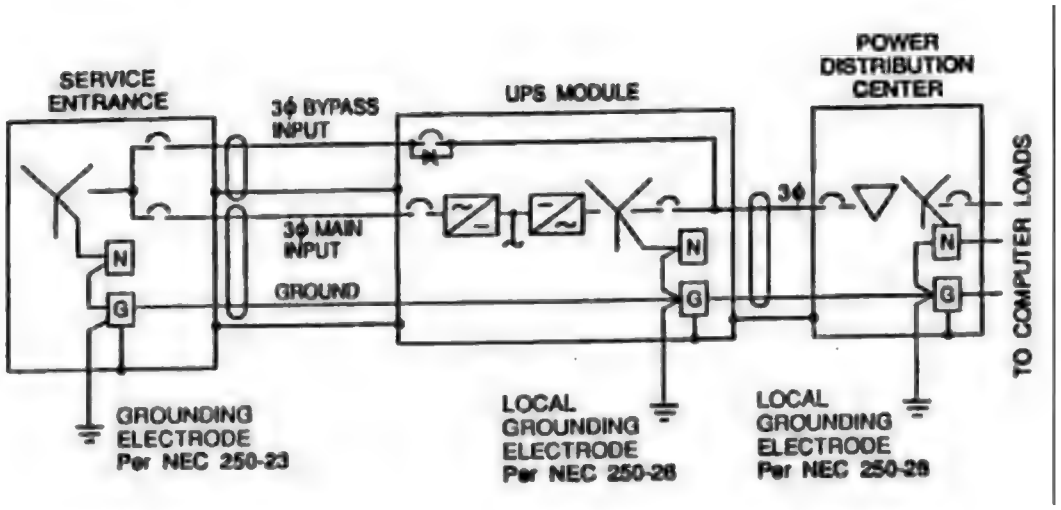


Fig. 12 Configuración 4

1.9.3.4.1 Arreglo de los conductores aterrizado/de aterrizaje: el neutro del equipo de la entrada de servicio no se llevó adentro del módulo del UPS. Entonces, éste se considera una fuente derivada separadamente; por lo tanto, el neutro se debe unir al conductor de aterrizaje del equipo y se debe instalar un conductor a un electrodo local de aterrizaje. Como el Centro de Distribución de Potencia tiene un transformador de aislamiento, también es una fuente derivada separadamente, su neutro se debe unir al conductor de aterrizaje del equipo y a un electrodo local de aterrizaje

1.9.3.4.2 Características/Comportamiento: el esquema de la FIG. 12 es una alternativa al esquema de la FIG. 11 cuando no hay neutro disponible en el puente de entrada, ya que:

(1) la entrada principal y el puente de entrada vienen de la misma fuente

(2) La fuente es una estrella aterrizada sólidamente, y

(3) no se necesita neutro para la carga del UPS

En algunos UPS, el neutro está en el puente de entrada aunque no se necesite en la salida; se usa para control y monitoreo del puente de entrada.

Como en la Configuración 3, como el Centro de Distribución de Potencia tiene transformador de aislamiento, la reducción del ruido del "common-mode" ocurre cuando el centro se localiza cerca de la carga.

1.9.3.5 Configuración 5: módulo de UPS sencillo, puente aislado, fuente conectada en delta (FIG: 13). Es similar a la Configuración 2, con la diferencia de que la entrada de servicio está conectada en delta

Muchos módulos de UPS necesitan que el puente de entrada se alimente desde una fuente conectada en estrella. En tal caso, se necesita el transformador puente con el secundario conectado en delta.

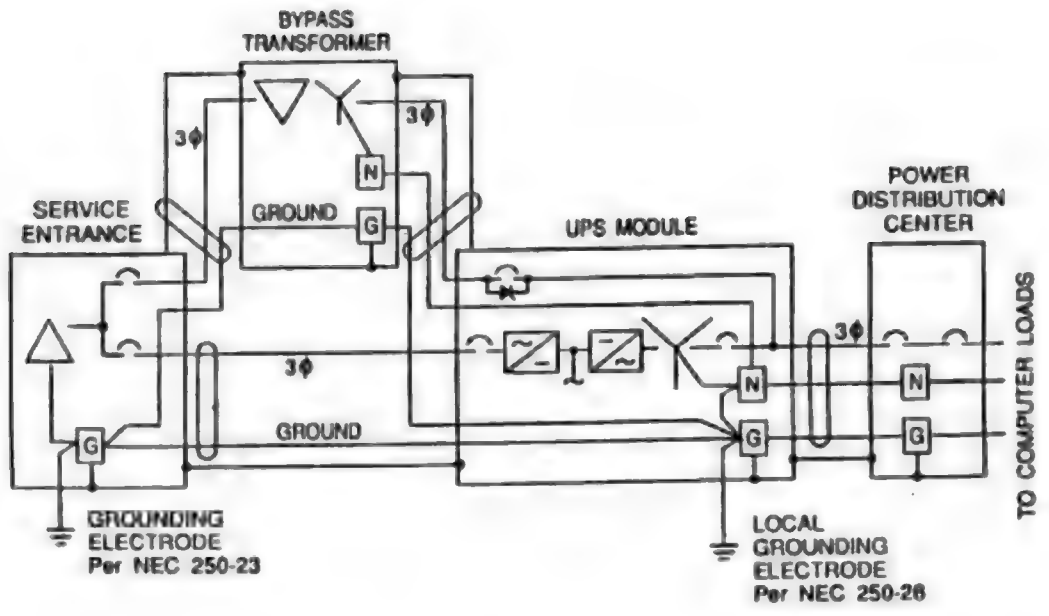


Fig. 13 Configuración 5

1.9.3.5.1 Arreglo de los conductores aterrizado/de aterrizaje: como en la configuración 2, el neutro del módulo del UPS se debe unir al conductor de aterrizaje del equipo y se debe instalar un conductor a un electrodo de aterrizaje local (250-26 del NEC).

1.9.3.5.2 Características/Comportamiento: como en la Configuración 2, se logra el aislamiento desde la entrada y se obtiene la atenuación del ruido "common mode", si el UPS y el transformador puente se localizan eléctricamente cerca (15 metros o menos) del Centro de Distribución de Potencia y de las cargas sensibles.

1.9.3.6 Configuración 6: es un ejemplo de sistema UPS con módulo múltiple. En realidad, el bloque del UPS tiene más de un módulo y todo se conecta a través de un solo interruptor estático de transferencia, incluyendo el puente, FIG. 14. Es una ampliación del esquema de aterrizaje mostrado en la FIG. 12

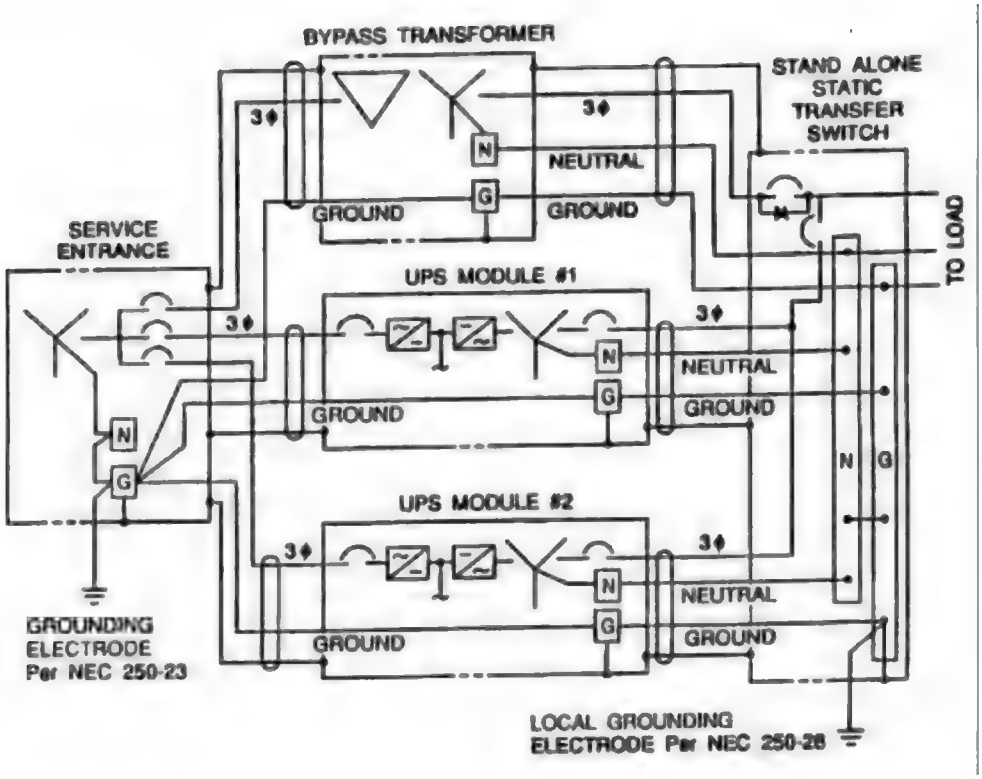


Fig. 14 Configuración 6

1.9.3.6.1 Arreglo de los conductores aterrizado/de aterrizaje: el transformador puente y los módulos 1 y 2 del USO son fuentes derivadas separadamente, ya que no hay conexión eléctrica directa entre los conductores de los circuitos de entrada y salida.

Para tener un punto central para unir el neutro de salida del UPS a la tierra del esquema total del UPS utilizamos el interruptor estático.
Cuando el neutro se une al conductor de aterrizaje en el interruptor estático solitario, el neutro desde los módulos del UPS y transformador puente hasta el interruptor estático se debe dimensionar para las cargas del interruptor estático. La conexión del neutro al conductor de aterrizaje y el conductor del electrodo de aterrizaje local se deben instalar de acuerdo con la sección 250-26 del NEC

1.9.3.6.2 Características/Comportamiento: al usar el interruptor estático para dar el punto central para unir el neutro al conductor de aterrizaje, como en este ejemplo de configuración de módulo múltiple de UPS, cualquier módulo del UPS se puede quitar o agregar del esquema total, sin poner en riesgo la integridad del sistema de aterrizaje.

Dependiendo de la configuración del módulo múltiple, los conceptos de aterrizaje de las configuraciones 1 a 5 se pueden aplicar.

1.9.3.7 Configuración 7: Sistema de UPS con módulo múltiple de 415 Hz. En la configuración 7 (FIG. 15), la entrada principal al módulo del UPS de 415 Hz está conectada al servicio estrella aterrizada, de la misma forma que las configuraciones de UPS de 60 Hz anteriores. Con los módulos de UPS de 415 Hz no se usa alimentador puente.

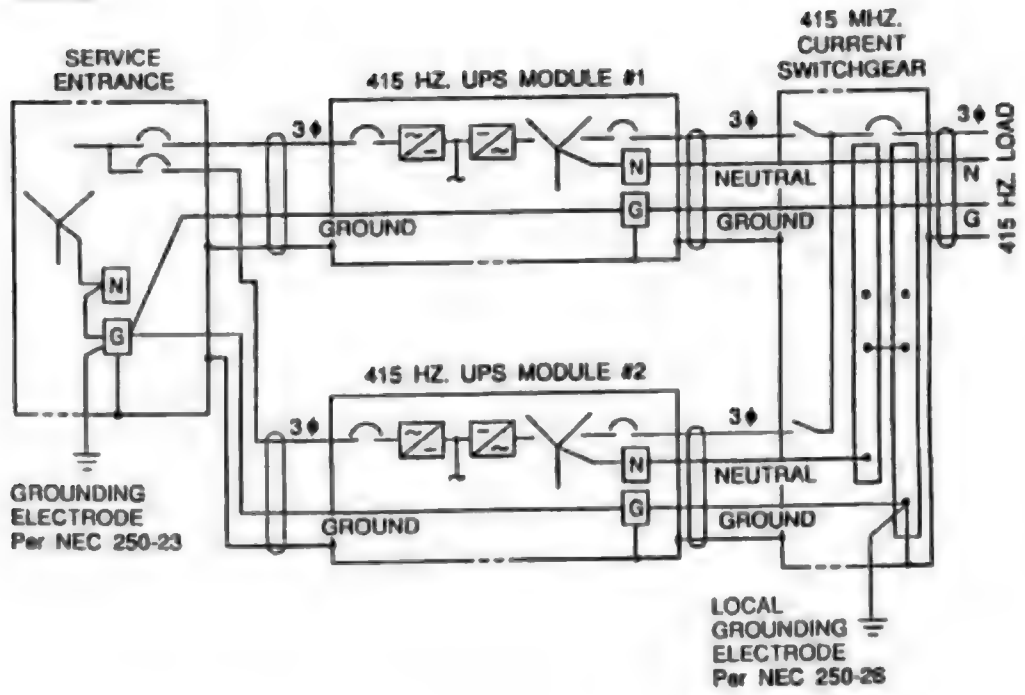


Fig. 15 Configuración 7

1.9.3.7.1 Arreglo de los conductores aterrizado/de aterrizaje: no hay alimentador puente, así, el neutro del equipo de la entrada de servicio no está conectado al neutro de la salida del UPS.

Entonces, el módulo del UPS se considera una fuente derivada separadamente.

El neutro de la salida del UPS se debe unir al conductor de aterrizaje del equipo y se debe instalar el conductor del electrodo de aterrizaje local, de acuerdo al NEC (250-26).

En este caso, ambos módulos del UPS cumplirían los requisitos del NEC para fuentes derivadas separadamente.

Para tener un punto central para unir el neutro de la salida del UPS a la tierra del sistema total del UPS, la unión del conductor de aterrizaje del neutro se debe hacer en el interruptor de salida.

Si se usa un módulo sencillo de UPS de 415 Hz, la unión del conductor de aterrizaje del neutro se debe hacer dentro del módulo del UPS.

1.9.3.7.2 Características/Comportamiento: al usar el interruptor de salida para dar el punto central para la unión del neutro al conductor de aterrizaje podemos quitar o poner el módulo del UPS al sistema paralelo sin poner en riesgo la integridad del esquema de aterrizaje.

1.9.3.8 Configuración 8: Módulo de UPS sencillo con Interruptor Puente de Mantenimiento. En la FIG. 16, el interruptor puente de mantenimiento se usa para aislar completamente el módulo del UPS de la carga crítica de corriente alterna durante el mantenimiento y las pruebas fuera de línea.

El servicio estrella aterrizada se conecta a la entrada principal y a la entrada puente del módulo sencillo del UPS y al interruptor puente de mantenimiento.

Si se necesita neutro para la carga crítica, que se une al conductor de aterrizaje en la entrada de servicio, se lleva adentro del módulo del UPS y del interruptor puente de mantenimiento.

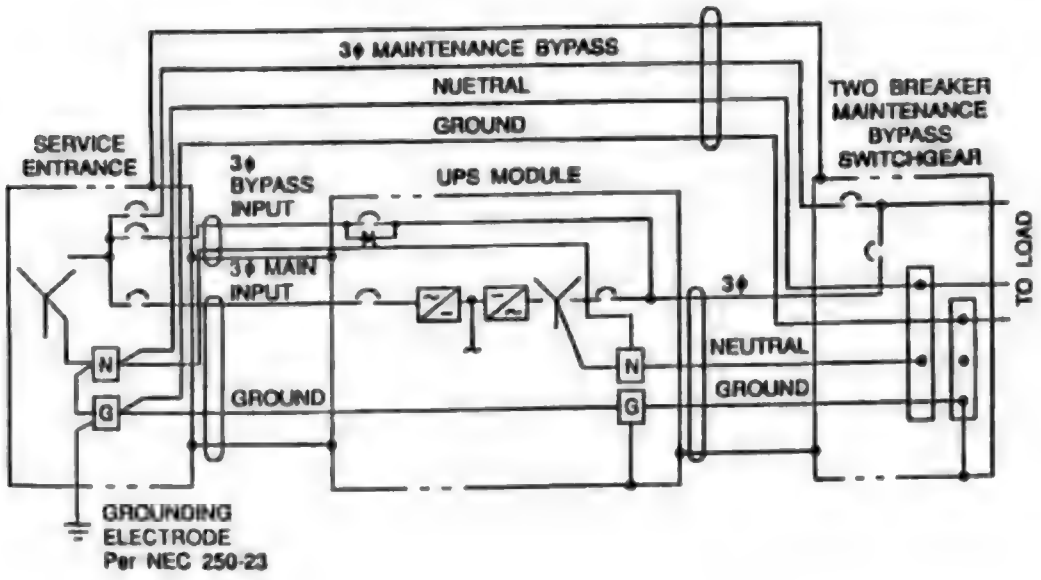


Fig. 16 Configuración 8 (4 hilos)

1.9.3.8.1 Arreglo de los conductores aterrizado/de aterrizaje: ya que los neutros de la salida del UPS y interruptor puente de mantenimiento están conectados al neutro de la entrada de servicio, el módulo del UPS no se considera una fuente derivada separadamente.

En este sistema:

(1) los neutros de la salida del UPS y del interruptor puente de mantenimiento no se deben unir al conductor de aterrizaje del equipo, y

(2) no se debe instalar un conductor de electrodo de aterrizaje local

1.9.3.8.2 Características/Comportamiento: este arreglo no da aislamiento o atenuación de ruido "common-mode" para cargas sensibles.

La atenuación se puede mejorar colocando cerca de las cargas sensibles un transformador de aislamiento.

También, ya que el Centro de Distribución de Potencia con transformador sólo necesita una entrada 3 fases, 3 hilos más tierra, no se necesita conectar el conductor neutro desde la entrada de servicio al puente del UPS ni desde la entrada de servicio ó salida del UPS al interruptor puente de mantenimiento (FIG. 17)

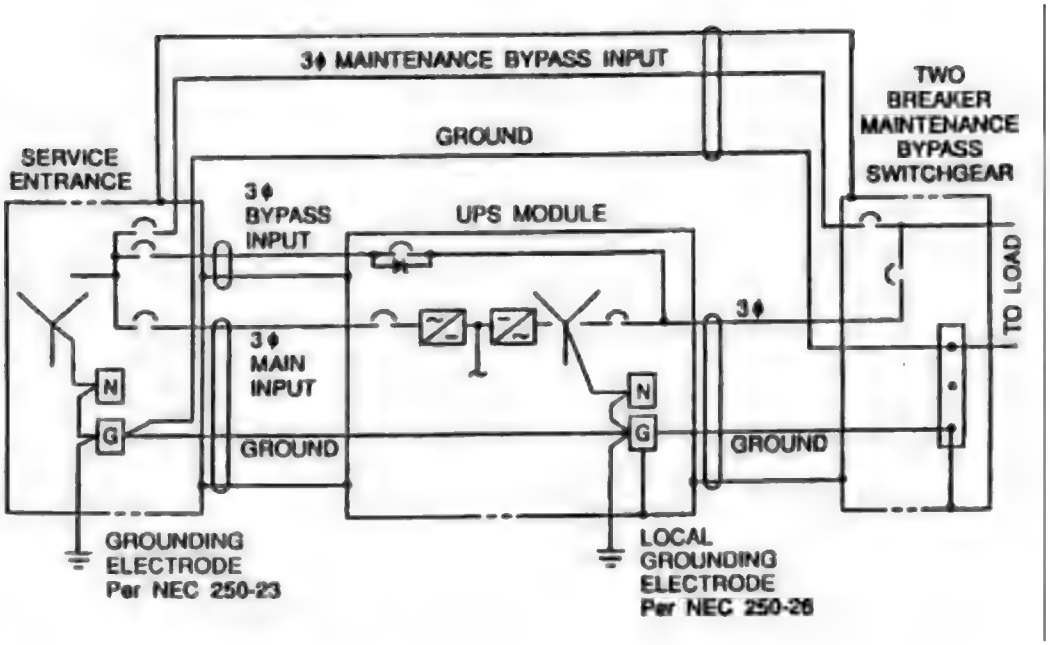


Fig. 17 Configuración 8 (3 hilos)

1.10 Sistemas Multivoltaje:

En cualquier sistema, puede ser que el voltaje no sea uniforme a través de todo el sistema debido a las caídas de voltaje provocadas por el flujo de corriente a través de las impedancias del sistema.

Estas diferencias de voltaje serán, normalmente, insignificantes en comparación con el voltaje aplicado sobre el aislamiento entre el conductor y tierra.

Sin embargo, el voltaje se puede cambiar sin crear un sistema separado usando un autotransformador o conectando en serie dos reactancias de signo opuesto.

1.10.1 Autotransformadores: se usan para reducir costos o para evitar creación de sistemas nuevos. A menos que el aterrizaje del sistema permita usar un autotransformador y el autotransformador se ocupe apropiadamente, su uso podría reducir seriamente la efectividad del aterrizaje y de los relés de tierra y exponer el equipo a un nivel de voltaje a tierra mayor que aquel para el cual se diseñaron.

El autotransformador trifásico en estrella, sin delta terciaria, tiene impedancia de secuencia cero extremadamente alta si no se conecta su neutro.

La FIG. 18 muestra que una falla a tierra en A' que l voltaje de línea a tierra de la fuente se le aplique a la sección AA' del autotransformador.

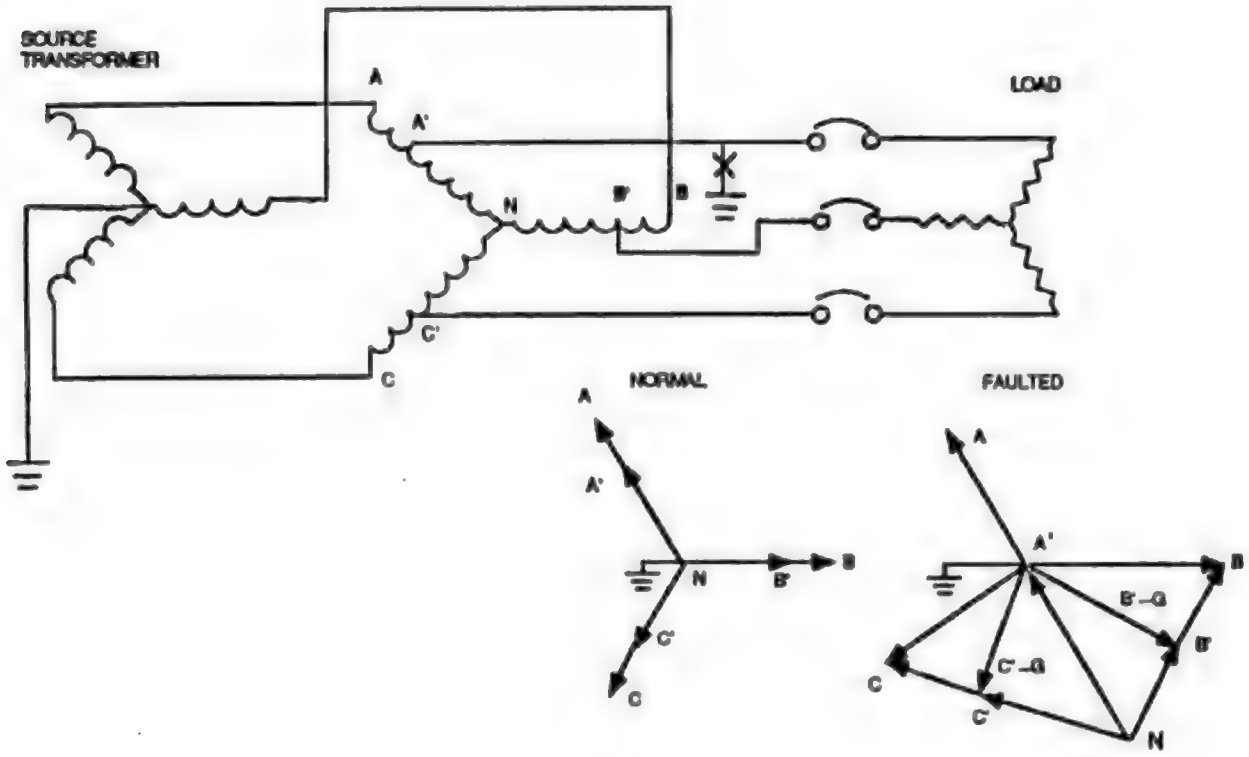


Fig. 18 Autotransformador reductor estrella no aterrizada. Relación normal de fasores

Esta sección del devanado debería ser capaz de soportar este voltaje; entonces, el voltaje a tierra en N, neutro del autotransformador, se elevará en proporción a la relación de vueltas de A'N/AA' y B' y C' tendrán voltajes a tierra mayores que B y C, que es el alto voltaje.

El voltaje secundario de línea a línea también se incrementará.

En la práctica, podría suceder que el devanado AA' no reciba el voltaje pleno, pero podría entrar en saturación, permitiendo cierta cantidad de corriente de secuencia cero.

En el proceso, creará componentes de voltaje de frecuencia alta, el voltaje es proporcional a la frecuencia.

Así, podríamos tener, en N, un voltaje alto con respecto a tierra.

Aunque el secundario del autotransformador fuera el alto voltaje, tendría sobrevoltaje por una falla secundaria de línea a tierra (Cap. 6 de Beeman).

Este autor menciona que el sobrevoltaje se puede provocar, también, por pulsos transitorios, como los producidos por "switcheo" o descargas eléctricas, aplicados a la sección del embobinado entre las conexiones primarias y secundarias.

La FIG. 19 muestra que cuando la fuente de un autotransformador reductor está aterrizada por impedancia, una tierra en el lado de la carga puede provocar que el voltaje a tierra, de B' y C', se aproxime al voltaje de línea a línea de la fuente.

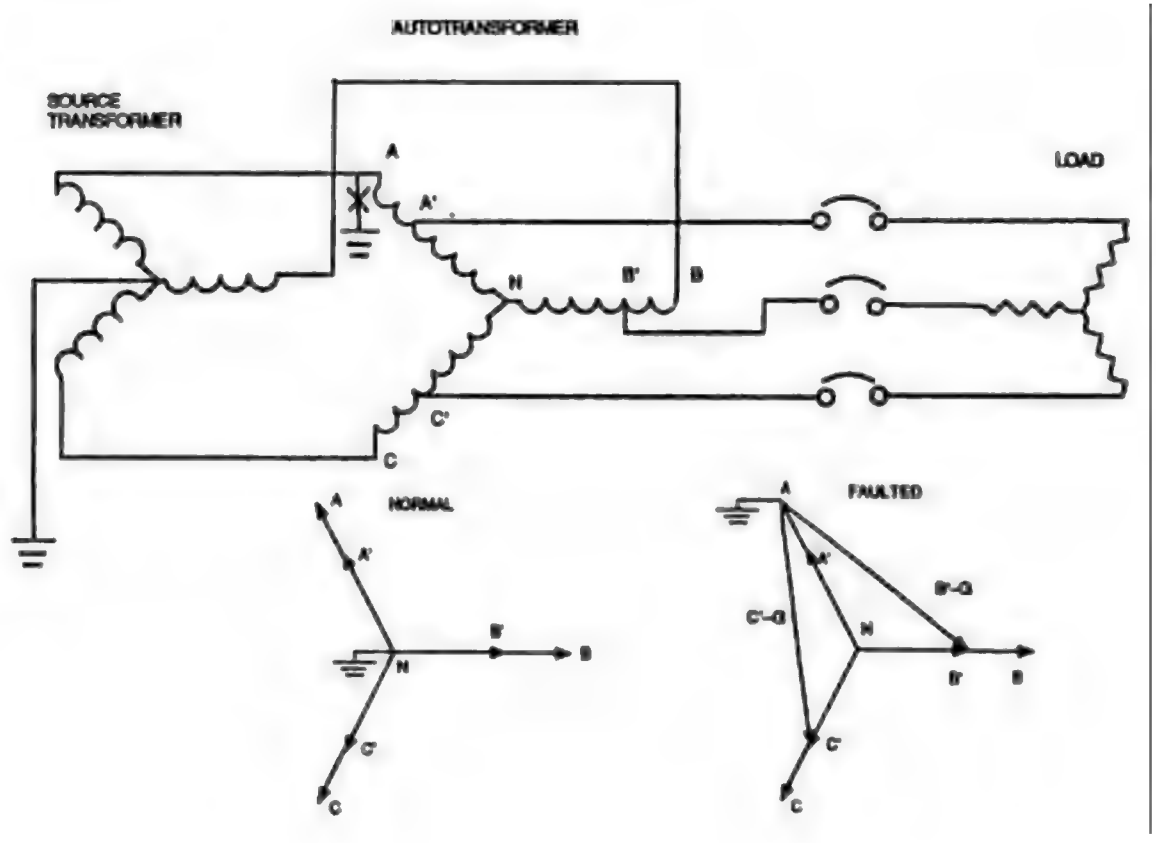


Fig. 19 Autotransformador reductor no aterrizado. Fasores con falla a tierra primaria

Si el autotransformador eleva el voltaje, el potencial a tierra en el sistema de bajo voltaje se establecerá entre lo que se muestra en la FIG. 20 y que también se puede alcanzar en la FIG. 18, dependiendo de la relación de la impedancia de aterrizaje a la impedancia de excitación del autotransformador.

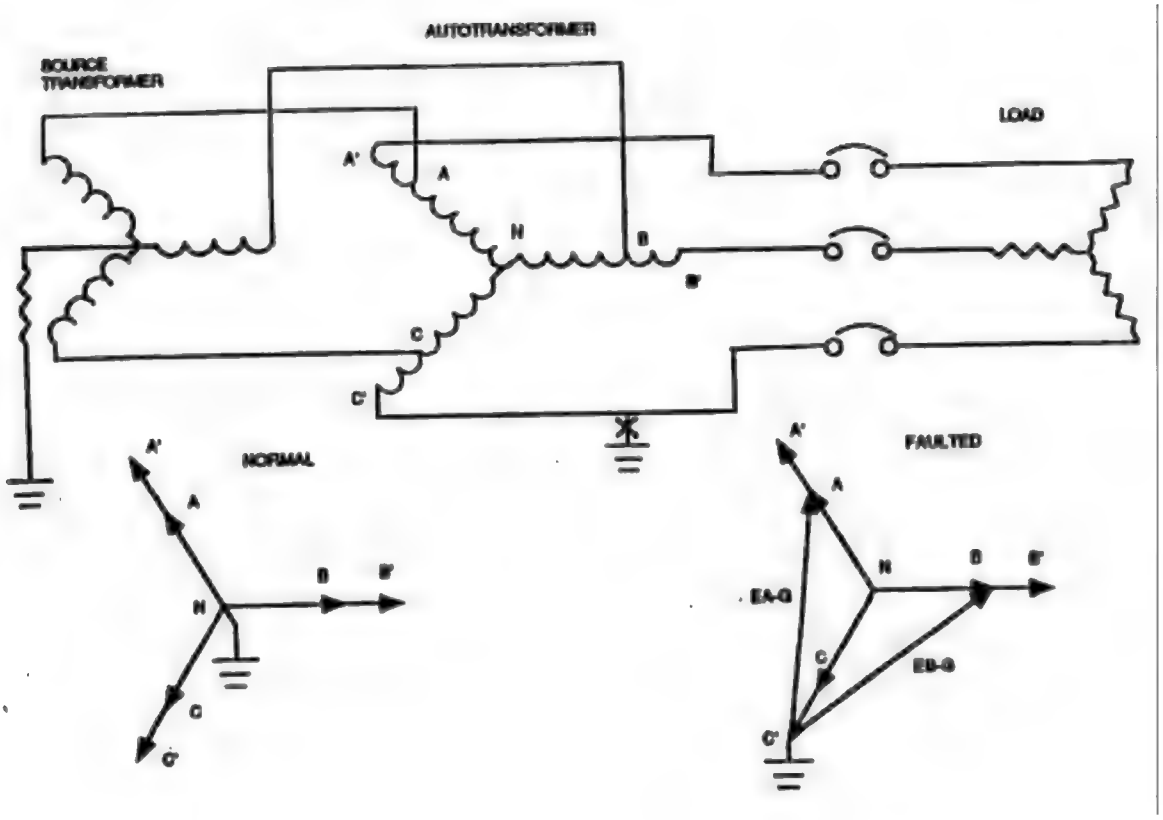


Fig. 20 Autotransformador elevador estrella no aterrizada. Fasores normales y con falla

Las FIGS. 21 y 22 muestran que los autotransformadores delta no ofrecen una reducción en el voltaje a tierra, en el sistema de bajo voltaje, comparable con la reducción en el voltaje de fase, lo cual reduce el costo-beneficio de escoger un autotransformador en vez de un transformador normal.

La versión delta abierta no ofrece reducción en el voltaje máximo a tierra y provoca un voltaje desbalanceado a tierra que puede ser indeseable.

En ningún caso, las fallas a tierra provocan voltajes incrementados que aparezcan en los embobinados del transformador y el voltaje de línea a tierra, en cualquier nivel, no excederá el voltaje de línea a línea más alto.

En NEC tiene restricciones para el uso de autotransformadores.

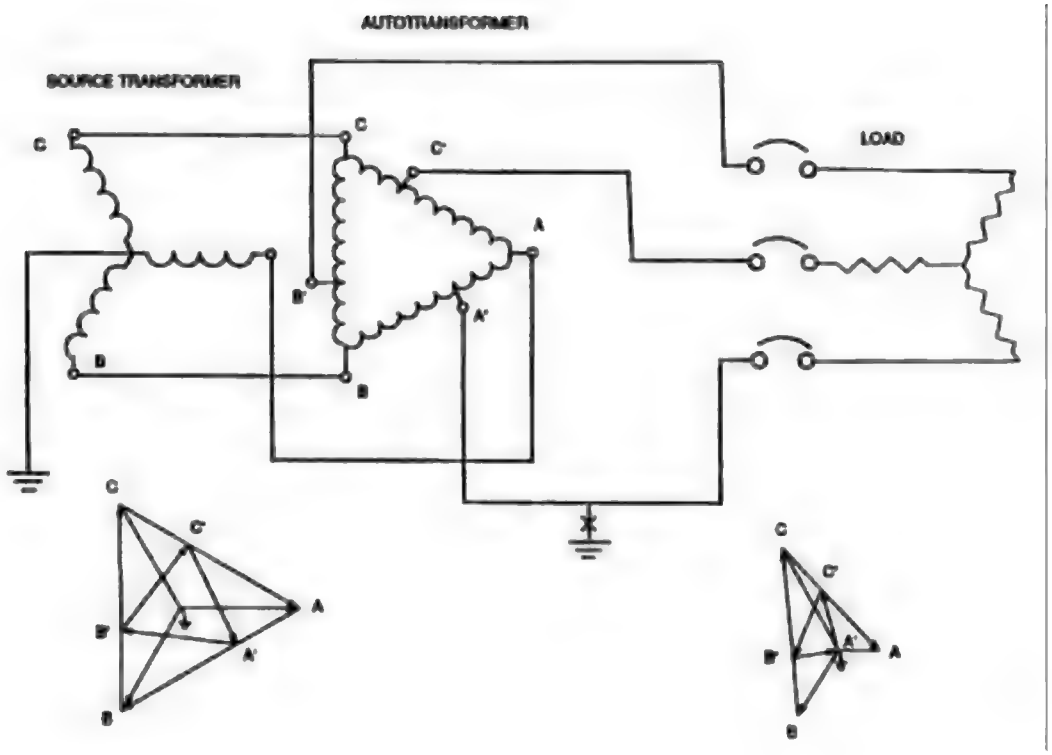


Fig. 21 Autotransformador delta

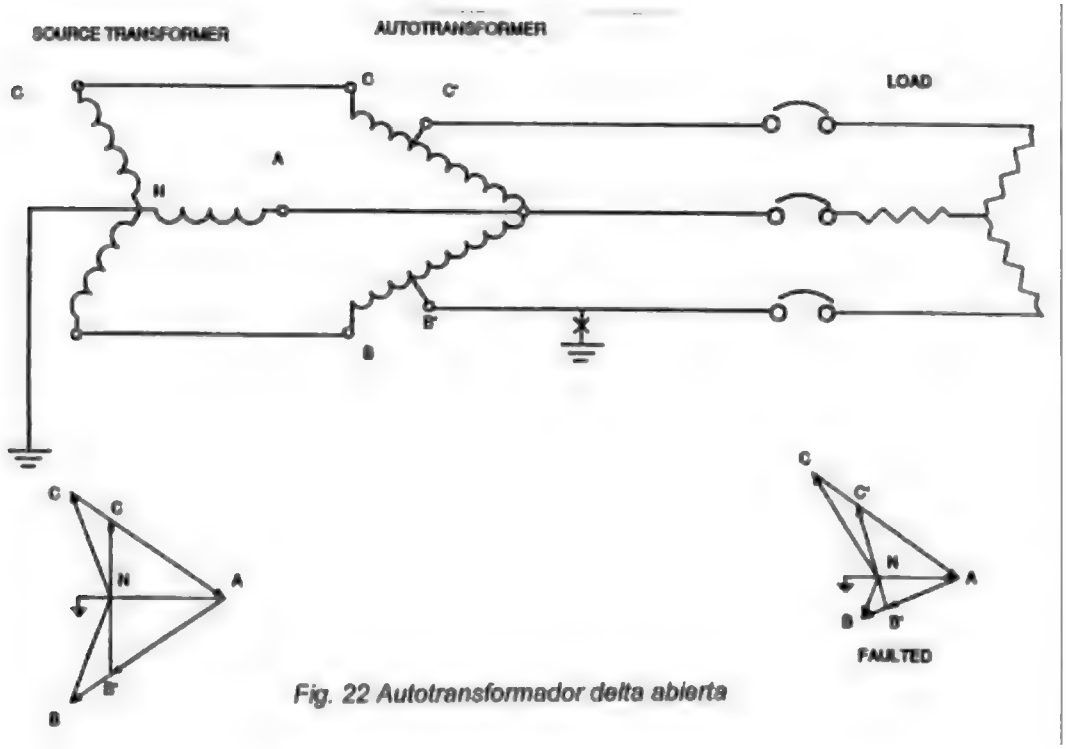


Fig. 22 Autotransformador delta abierta

La FIG. 23 muestra la configuración correcta para usar un autotransformador.

Debe haber una conexión efectiva entre el neutro del autotransformador y el neutro del transformador de la fuente para el flujo de las corrientes de secuencia cero.

Sólo se extiende el neutro de la fuente, no se necesita conexión a tierra en el autotransformador para cumplir con la Sección 250-23 del NEC.

Aparentemente, un circuito alimentado con un autotransformador no cumple el criterio de sistema derivado separadamente.

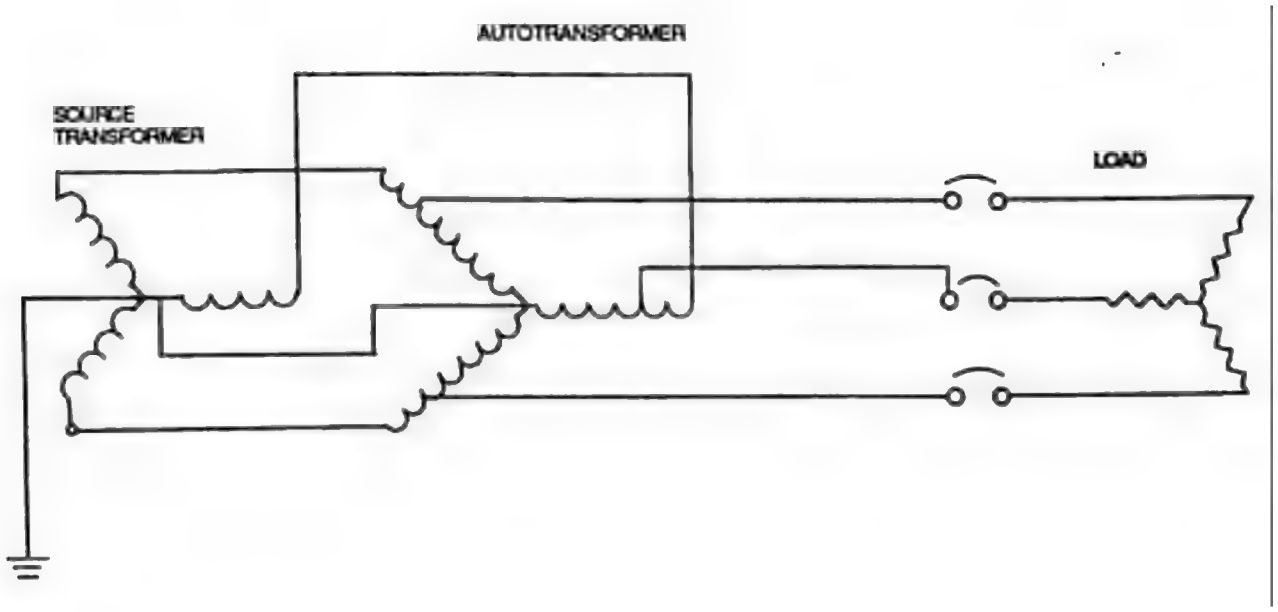


Fig. 23 Autotransformador estrella. Conexión 4 hilos, neutro aterrizado

1.10.2 Transformadores estrella-estrella: se muestra en la FIG. 24, con los neutros primario y secundario interconectados y aterrizados.

Esta configuración sólo se usa en sistemas de distribución, de compañías distribuidoras, aterrizados sólidamente, especialmente en sistemas subterráneos, para prevenir la ferrorresonancia cuando los interruptores de la fuente se pueden operar con un polo a la vez.

La compañía aterriza el punto neutro primario para reducir el voltaje de neutro a tierra, a lo largo de la línea de distribución, y por lo tanto, en los sistemas subterráneos, cable neutro concéntrico desnudo.

Conectan a tierra el neutro secundario para dar un servicio en bajo voltaje, aterrizado efectivamente

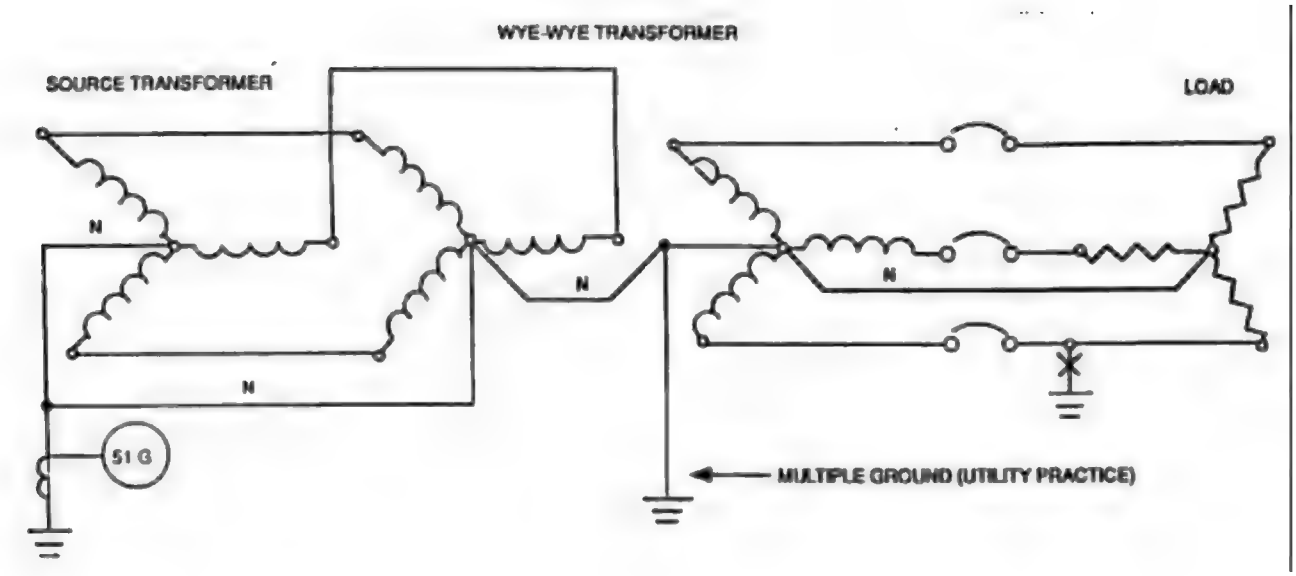


Fig. 24 Transformador estrella aterrizada-estrella aterrizada. Neutro común multiaterrizado

Notemos que este aterrizaje múltiple del primario de cada uno de los transformadores no es esencial para prevenir la ferroresonancia o para dar aterrizaje secundario en toda la longitud del cuarto conductor que llega al neutro primario del transformador.

La conexión del neutro al bastidor del transformador y a tierra minimiza el voltaje de neutro a tierra durante una falla entre el primario y el bastidor del transformador.

En un sistema de distribución industrial, la longitud física del circuito será suficientemente corta para que los voltajes excesivos de neutro a tierra no se presenten si el neutro común del transformador no está aterrizado.

La Sección 250-23 del NEC, normalmente prohibe aterrizar el neutro en el lado de la carga del desconectador del servicio; pero la Sección 250-152(2) permite el multiaterrizaje del neutro de una línea aérea exterior o cable desnudo con neutro desnudo, si el voltaje del circuito está arriba de 1,000 V.

Con la conexión continua desde el neutro de la fuente a los neutros primario y secundario del transformador YY, la salida del transformador no es un sistema derivado separadamente, como se define en la Sección 250-5(d) del NE.

Si el neutro está aterrizado en la fuente, la salida del transformador YY será continuación del sistema aterrizado, hasta el voltaje secundario del transformador.

En comportamiento es casi similar al transformador de la FIG. 25, excepto que agrega la seguridad de tener conexión metálica entre primario y secundario sólo en el punto neutro.

El circuito alimentado por el transformador YY de la FIG. 25 se debe considerar un sistema derivado separadamente, ya que no hay conexión metálica directa entre el primario y secundario del transformador.

Las fallas a tierra primarias y secundarias se miden y limpian separadamente.

La salida del secundario no se aterrizará, a menos que se haga una conexión a Tierra desde el secundario del transformador.

El secundario se podría aterrizar por impedancia.

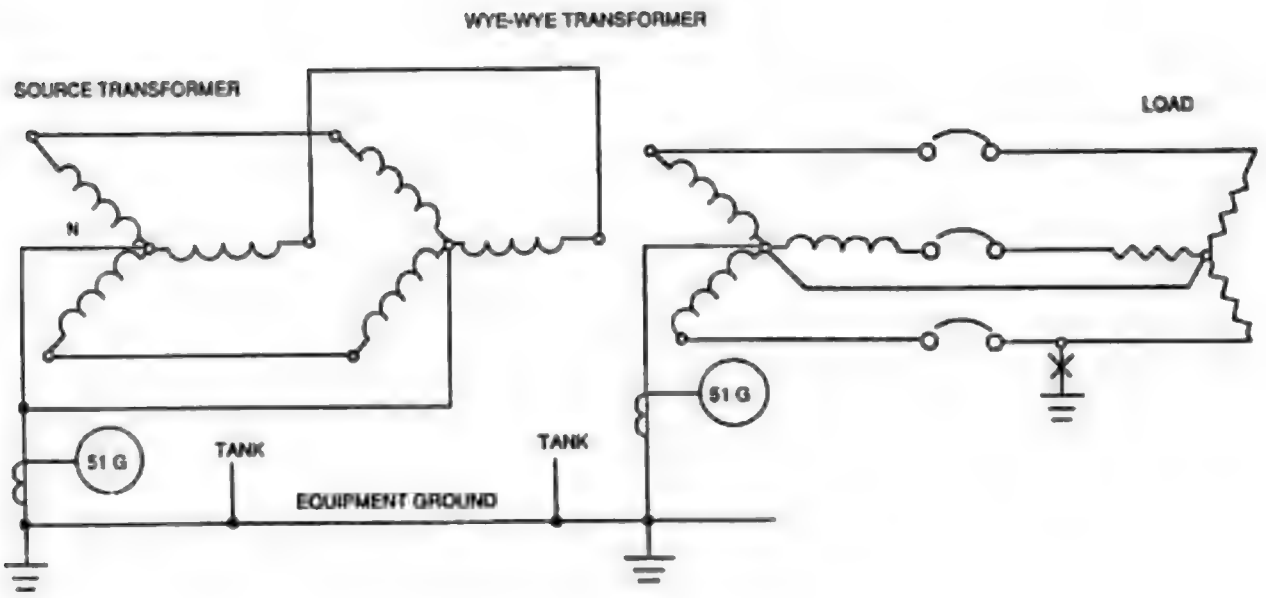


Fig. 25 Transformador estrella aterrizada-estrella aterrizada. Neutros aterrizados separados

El aterrizaje del neutro secundario también necesita una conexión desde el neutro de la fuente primaria hasta el neutro primario del transformador YY para dar la corriente de secuencia cero.

A diferencia del transformador delta-estrella, el mismo transformador YY no es fuente de corriente de secuencia cero.

El aterrizaje se puede lograr sin conexión del neutro primario si se aterriza una fase del secundario, distinta del neutro, ya que ninguna corriente de secuencia cero está involucrada. El efecto es idéntico al aterrizaje de una esquina del transformador delta-delta.

Si al transformador YY le agregamos un terciario en delta, no suministrará la corriente de secuencia cero desde la fuente, necesariamente, ya que el terciario actuará como fuente de corriente de secuencia cero.
Entonces, el transformador YY se puede considerar como parte de un sistema multivoltaje sencillo, si los neutros están interconectados o se puede considerar que crea un sistema separado si no están interconectados.

La simetría de la YY permite dar aterrizaje al sistema del lado de su carga, aunque la fuente y la carga se intercambio en cualquier momento.

1.10.3 Voltajes producidos "resonantemente": este término se aplica al voltaje que aparece en la unión entre reactancias de signo opuesto conectadas en serie, aunque realmente, las reactancias no sean resonantes a la frecuencia de la fuente.

La variación del voltaje con respecto al voltaje de la fuente será función de la cercanía de los elementos que resonarán y de la relación (Q) de la reactancia inductiva a la resistencia.

Comúnmente se usan capacitores en serie con cargas de bajo factor de potencia, en donde el "switcheo" y otras variaciones crean excursiones de voltajes objetables.

La FIG. 26 representa el circuito de un soldador de punto cuya inductancia se fija con las dimensiones de la máquina, pero cuya carga resistiva puede variar.

Con corrección total del factor de potencia, la elevación de voltaje en los terminales del capacitor puede ser 1.732 E a 0.5 f.p. Y 4.9 E a 0.2 f.p.

Con la falla a tierra que se muestra, este 4.9 E en los terminales del capacitor se aplicará entre el transformador fuente y tierra.

Tanto el transformador como su impedancia de aterrizaje se someterán a este sobrevoltaje.

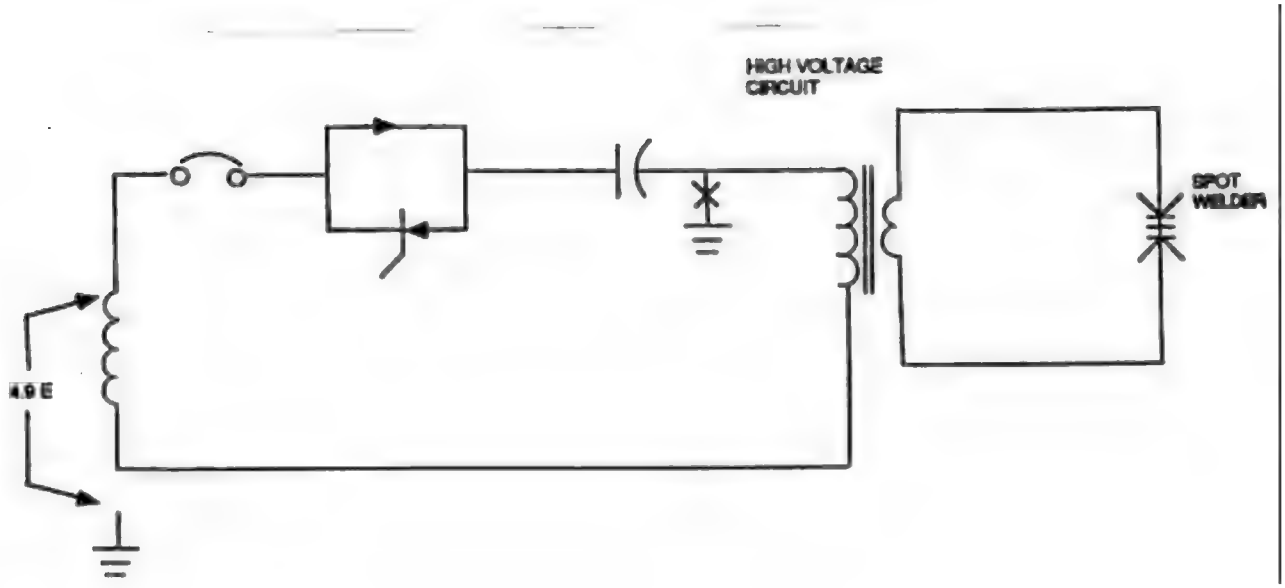


Fig. 26 Soldador capacitor resistor serie

Por esa razón, estos capacitores serie sólo se deberían usar en sistemas aterrizados efectivamente, lo cual limita la elevación del voltaje a valores seguros.

El circuito de reactancias en serie más común se crea cuando se conecta una carga capacitiva, generalmente para corregir factor de potencia y/o voltaje.

Como estos capacitores están en serie con la reactancia de la fuente del sistema de potencia, el voltaje se eleva.

La elevación de voltaje provocada por capacitores de factor de potencia de tamaño normal no debe exceder 5%-10% en condiciones extremas, ya que el sistema no llega a resonancia a la frecuencia fundamental de potencia.

No se necesita cambiar de "clase" de voltaje y no hay peligro presente.

El tema lo hemos escogido sólo para que sirva de ejemplo familiar de reactancias en serie.

La resonancia se tiene por la adición de capacitores de factor de potencia en frecuencias múltiplos del sistema de potencia.

Cuando hay fuentes de armónicos, como cargas no lineales, los voltajes armónicos que resultan pueden llegar a condiciones resonantes.

Normalmente no alcanzan valores peligrosos.

Si se llegara a valores peligrosos, se reducirían rápidamente por la sobrecorrientes en los capacitores que provocarían la operación de sus fusibles y el circuito se saldría de sintonía.
Los impulsos de voltaje se pueden amplificar y extender como oscilaciones amortiguadas (ondas sonoras) en los circuitos resonantes.

Esos voltajes pueden exceder las capacidades del aislamiento.

Las condiciones resonantes, que son propensas a las oscilaciones continuas por la falta de carga resistiva (amortiguación), se pueden iniciar con el "switcheo" o por fallas en el sistema.

El ejemplo más común es el que se crea con el "switcheo" monofásico del primario del transformador, cuando no hay carga secundaria.

Esto provoca la condición "ferroresonante", cuando la impedancia de excitación del transformador interactúa con la capacitancia del cable primario.

Estos voltajes producidos resonantemente no se consideran como sistema o voltajes útiles, excepto en el uso que se le da en el soldador por resistencia.

Entonces, no crean sistemas multivoltaje, pero los hemos mencionado porque se podrían evitar.

Además del incremento de la capacidad de impulso en el aislamiento, la defensa principal contra esos voltajes es suprimirlos.

Hay otras situaciones en que se pueden producir voltajes altos al crear, inadvertidamente, las condiciones resonantes.

Generalmente, se deben a fallas en el aislamiento, fallas de equipo o configuraciones no intencionales de los circuitos.

Los voltajes serán más peligrosos si se llega a o cerca de las condiciones resonantes.

Cuando el elemento inductivo tiene un núcleo de hierro, la inductancia puede variar porque el hierro se satura debido al voltaje alto, lo cual, al mismo tiempo, causa corrientes no senoidales que producen armónicas.

Esto puede llevar a las condiciones resonantes que llamamos: "ferroresonancia"

No son voltajes del sistema porque no son intencionales y pueden ser transitorios, por naturaleza.

En algunos casos, la ocurrencia de esos voltajes se puede afectar o eliminar con el diseño del aterrizaje, con el diseño del transformador o con el comportamiento de los equipos de "switcheo" (conmutación).

Una causa común de ferroresonancia es el voltaje aplicado en el embobinado del transformador y la capacitancia a tierra del conductor, cuando el conductor se está desconectando de su fuente normal.

Si el transformador está conectado en delta, el aterrizaje del neutro prevendrá el voltaje aplicado a esa conexión en serie.

La condición resonante producida por una bobina aterrizada actuando en serie con la capacitancia de línea a tierra de un sistema no aterrizado, se puede aliviar si la capacitancia se evita aterrizando el sistema.

1.11 Sistemas de suministro de energía a equipo portátil de minería:

El concepto de proteger al personal y equipo eléctrico de minería con aterrizaje apropiado existe desde que se introdujo la electricidad en las minas.

En 1916, la Oficina de Minas de U.S.A. Recomendó el aterrizaje del bastidor de los equipos para prevenir de choques eléctricos a los mineros que trabajan con o en las cercanías de equipo eléctrico.

El aterrizaje adecuado ha sido un problema difícil para la industria de la minería, a veces, más complejo y desafiante que para otras industrias.

Los peligros asociados con fallas a tierra se amplifican por la naturaleza portátil y móvil de esos sistemas de potencia; los aterrizajes de los sistemas y de los equipos están interrelacionados.

Una máquina de mina superficial puede tener una demanda de potencia de 18,000 HP a 25 kv. ó más. La demanda de potencia de máquinas de minería subterránea puede exceder

de 1,100 HP a 4.16 kv. El equipo portátil se debe diseñar para permitir que el personal se acerque (y toque) las estructuras de los aparatos, sin riesgo de choque eléctrico.

Enfatizaremos los aspectos de aterrizaje de los sistemas de suministro (la Sección 2.6 de este libro tiene más información sobre este tema).

La FIG. 27 ilustra un arreglo simplificado de un sistema de potencia en minas.

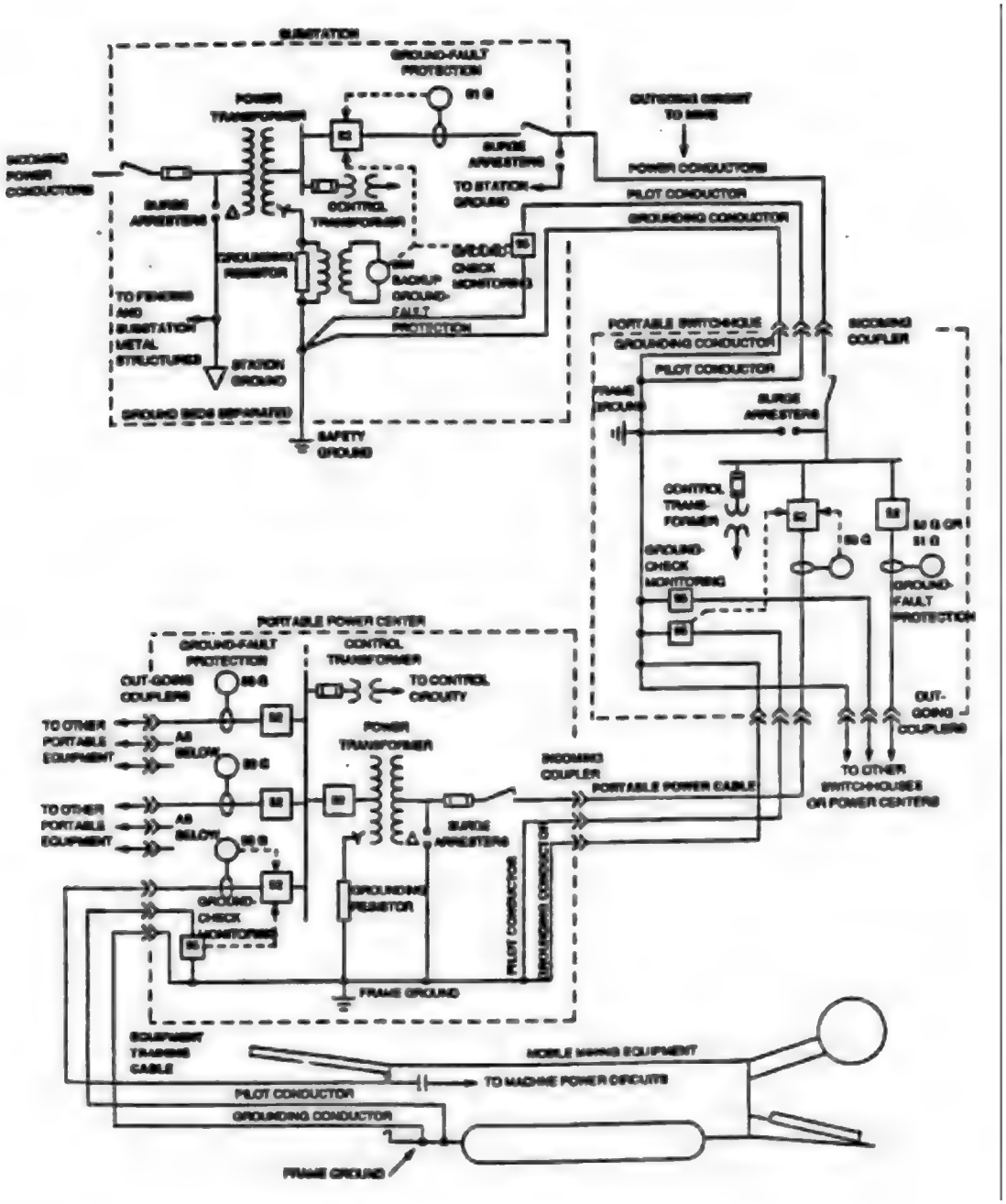


Fig. 27 Sistema simplificado de distribución de potencia en minas con un sistema aterrizado seguro. (Por simplicidad se ha omitido los esquemas de protección de sobrecorriente y de cortocircuito)

La subestación transforma el voltaje de suministro a niveles de distribución, que casi siempre es radial; se usan líneas aéreas en la superficie y cables para alimentar los disyuntores localizados cerca de las concentraciones de carga.

Típicamente, los interruptores se conectan con cables portátiles a centros de potencia portátiles, con bajo voltaje, a través de cables tendidos, hasta el equipo que la utiliza (cargadores, descargadores, etc.)

En las minas superficiales, las palas y dragas se alimentan al voltaje de distribución y el cable tendido completa el circuito de potencia, desde la caseta de interruptores hasta las máquinas.

Se usan subestaciones portátiles o centros de potencia porque los niveles de distribución y utilización son diferentes.

La técnica de aterrizaje recomendada para usarla con estos equipos portátiles o móviles es un sistema de tierra de seguridad con aterrizaje por resistencia.

La FIG. 27 ilustra el concepto, y por claridad de los sistemas de aterrizaje y relés protectores asociados, no se muestra los equipos de protección de sobrecarga y cortocircuito.

La subestación tiene 2 cuadros de tierra (cimentaciones) distintos, separados alguna distancia.

Los pararrayos de la subestación, cercas y estructuras de los equipos se conectan al cuadro de tierra del sistema, debajo de la superficie de la subestación.

El transformador de la subestación, sea delta/estrella, delta/delta ó estrella (no se recomienda YY) y el neutro secundario (directo o derivado), se conectan al cuadro de tierra de seguridad, a través del resistor de aterrizaje del neutro.

Cada estructura del equipo de corriente alterna, en el sistema de distribución, se conecta por conductores de aterrizaje, al cuadro de tierra de seguridad.

La intención es que el cuadro de tierra de la estación atienda las descargas, otras condiciones de pulsos del primario del transformador y las fallas de línea a tierra del sistema primario.

El propósito del cuadro de seguridad es mantener las estructuras de los equipos cerca del potencial de tierra, la resistencia de este cuadro de tierra debe ser baja para que no se desarrollen potenciales peligrosos en los bastidores o estructuras de los equipos.

La separación entre ambos cuadros se necesita para aislar las elevaciones de voltaje del sistema de tierra del primario (5 kv. ó más).

La resistencia debe ser 5 Ω ó menos.

Para lograr esta separación necesaria, se necesita mucha distancia

El diseño es complejo y se deben examinar muchas variables para llegar a una configuración óptima. (El IEEE Standard 367-1987 ANSI tiene información sobre esta separación).

En cada etapa de transformación, dentro del sistema de distribución, como en un centro portátil de potencia, se establece un punto neutro adicional, en el secundario del transformador.

El neutro se conecta por medio de un resistor de aterrizaje, al bastidor del equipo, y, así, por los conductores de aterrizaje, al cuadro de la tierra de seguridad.

Por el uso extensivo su cable de distribución y su capacitancia inherente de línea a tierra, los límites de la corriente de falla a tierra son mayores que los recomendados para aterrizar por resistencia alta.

La práctica en USA especifica diferentes límites de corriente máxima, dependiendo del voltaje del sistema.

Cuando es mayor de 1,000 V, la corriente de falla se limita a un valor tal, que los potenciales de los bastidores, en esa parte del sistema, no excedan de 100 V en condiciones de falla.

Para fines prácticos, supongamos impedancia del conductor de aterrizaje de 2 Ω, el límite de corriente de falla será 50 A; sin embargo, muchas subestaciones que atienden minas usan un límite de corriente de falla de 25 A.

Para segmentos del sistema de potencia a/ó debajo de 1,000 V, el límite de la corriente de falla debe ser 25 A ó menos, pero el valor típico es 15 A

El equipo de distribución y utilización (en minería), en minas superficiales, es mayor de 1,000 V.

El sistema de distribución de minas subterráneas, generalmente es mayor de 1,000 V; pero el equipo es menor de 1,000 V.

Para el sistema de tierra de seguridad es esencial la selección correcta y la coordinación correcta de la circuitería de protección.

Independientemente del lugar en que ocurre la falla, la corriente de falla a tierra está limitada, principalmente por el resistor de aterrizaje y es casi imposible la coordinación selectiva, en cada nivel de voltaje, sólo con el ajuste del disparo

El disparo común del relé de falla a tierra es 40% del límite de corriente de falla, y los ajustes de tiempo dan protección multietapa.

Se deben consultar las regulaciones, antes de seleccionar un esquema específico de protección de falla a tierra.

La FIG. 27 incluye un arreglo típico de relevo.

El relevo de secuencia cero (generalmente instantáneo) establece primero la protección de falla a tierra para el circuito utilizado.

Aunque no se muestra, se puede usar (o exigir) protección de respaldo agregando un relé de secuencia cero con retardo de tiempo, en el secundario del transformador del centro de potencia ó un relé de potencial en el resistor de aterrizaje.

Para el sistema de distribución, la protección principal de falla a tierra en el interruptor, establece una zona de protección para cada uno de los circuitos que salen, típicamente se usa relé contra secuencia cero (ajuste instantáneo o dial de tiempo mínimo)

El relé de secuencia cero con retardo de tiempo o relé residual, en la subestación, da ambas protecciones de respaldo para el relevo "aguas abajo" con la tierra de seguridad de la subestación.

Las regulaciones federales de USA especifican separación por distancia; por ejemplo, un mínimo de 25 pies (7.6 m) y "resistencia baja" para cada una de las protecciones del sistema y de falla primaria a tierra, para la zona entre su localización y el interruptor.

El relevo de potencial en el resistor de aterrizaje también da protección de respaldo (a veces se exigen ambos relés en la subestación).

Para que el sistema de tierra de seguridad sea efectivo, los conductores de aterrizaje deben ser continuo y se usan monitores de tierra (relés) para verificar la continuidad.

Los conductores piloto se muestran en cada uno de los monitores, pero no se necesitan cuando se usan relés sin piloto.

Todos estos sensores actúan para disparar el interruptor del circuito asociado y remover toda la potencia del segmento afectado en el sistema

La operación correcta del sistema de tierra de seguridad descansa en tres conceptos:

(1) La Tierra no se puede usar como conductor de aterrizaje.
(2) El sistema de aterrizaje que sirve a equipo portátil y móvil se debe mantener aislado.
(3) La protección de falla a tierra se debe dar en cada uno de los circuitos que salen de la subestación.

A veces, estos criterios difícilmente se logran cuando se alimentan otras cargas, desde el transformador de la subestación, como las plantas de preparación y equipos de ventilación.

En todo caso, cada una es particularmente importante, cuando una mina subterránea se conecta a la subestación.

Para asegurar la integridad del sistema de aterrizaje, es mejor que la distribución de la mina subterránea se alimente desde embobinados secundarios de transformadores separados.

2.- ATERRIZAJE DE EQUIPOS

2.1 OBJETIVOS BASICOS

2.1.1 GENERALIDADES: el término "***aterrizaje de equipo"*** se refiere a la interconexión y aterrizaje de los elementos metálicos no eléctricos de un sistema. Ejemplos de componentes de los sistemas de aterrizaje de equipo son: conduit metálico, bastidores de motores, encerramientos de equipos, y un conductor de aterrizaje.

Notemos que un ***"conductor de aterrizaje"*** es parte del sistema de aterrizaje del equipo; en cambio, un ***conductor aterrizado*** es parte del sistema de distribución de potencia.

Los objetivos básicos de un sistema de aterrizaje de equipo son los siguientes:

(1) Reducir el peligro de choque eléctrico al personal

(2) Suministrar capacidad adecuada de conducción de corriente, tanto en magnitud como en duración adecuada, para aceptar la corriente de falla a tierra, que permite el sistema de protección de sobrecorriente, sin provocar fuego o explosiones peligrosas para el edificio o para lo que está adentro del mismo.

(3) Dar un retorno de impedancia baja para la corriente de falla a tierra necesaria para la operación a tiempo del sistema de protección de sobrecorriente.

2.1.2 EXPOSICION AL VOLTAJE: las estadísticas de accidentes en la industria eléctrica, presentan evidencias claras de que muchos de los daños personales los provocan los choques eléctricos, como resultado del contacto con los elementos metálicos, que normalmente no están energizados, y que se espera que permanezcan "no energizados". Esos daños personales se podrían eliminar, usando equipo efectivo de puesta a tierra.

Cuando hay contacto "no intencional" entre un conductor eléctrico sin energía y la armazón o estructura metálica que lo encierra (ó que está adyacente), la armazón o estructura tiende a energizarse al mismo nivel de voltaje que existirá en el conductor energizado.

Para oponerse a esta tendencia y para evitar la exposición a un choque peligroso de voltaje, el conductor de puesta a tierra del equipo debe ofrecer una trayectoria de impedancia baja, desde la armazón hasta la referencia de potencial cero, en la unión, en la entrada de la fuente o de servicio.

La impedancia del conductor de puesta a tierra debe ser suficientemente baja como para aceptar la magnitud total de la corriente de falla a tierra, sin provocar una caída de voltaje IZ peligrosa. Está claro que el factor determinante para las características del conductor, será el valor de la corriente de falla del sistema de suministro.

2.1.3 EVASION DE DAÑOS TERMICOS: además de buscar que el peligro de exposición al choque eléctrico, por voltaje, sea bajo, el conductor de puesta a tierra debe funcionar, conduciendo la corriente total de falla a tierra (en magnitud y duración), sin elevar excesivamente la temperatura o sin causar la expulsión de chispas o arcos que pudieran iniciar un incendio o una explosión.

No es suficiente usar un conductor de sección grande. Se debe instalar, de tal forma, que la impedancia total del circuito de falla, incluyendo el conductor de puesta a tierra, permita la amplitud de corriente suficiente, para provocar la operación del sistema de protección.
La instalación debe dar el retorno más favorable (de baja impedancia) que cualquier otra trayectoria posible que pudiera tener una capacidad de conducción de corriente insuficiente o inadecuada.

El resumen de los reclamos a las compañías aseguradoras indica que uno de cada siete incendios, en establecimientos industriales, tiene su origen en el sistema eléctrico.

Aunque, también es cierto, que estos informes contienen algunas responsabilidades injustificadas, en la categoría de alambrado defectuoso, la mayoría de los incendios se produce por dificultades en la operación del sistema eléctrico. Sin embargo, se pueden reducir los riesgos de incendio, con el desarrollo y la adopción de métodos más efectivos en el equipo de puesta a tierra de los sistemas.

En corriente alterna, la impedancia total (r + j X), es la que controla la división de corriente entre las trayectorias en paralelo. En 60 HZ, de 40 amperios o menos, la reactancia jX del circuito es insignificante, pero puede ser importante en los circuitos de 100 a 200 amperios, y es la que predomina en los circuitos de más de 200 amperios. (Fig. 28)

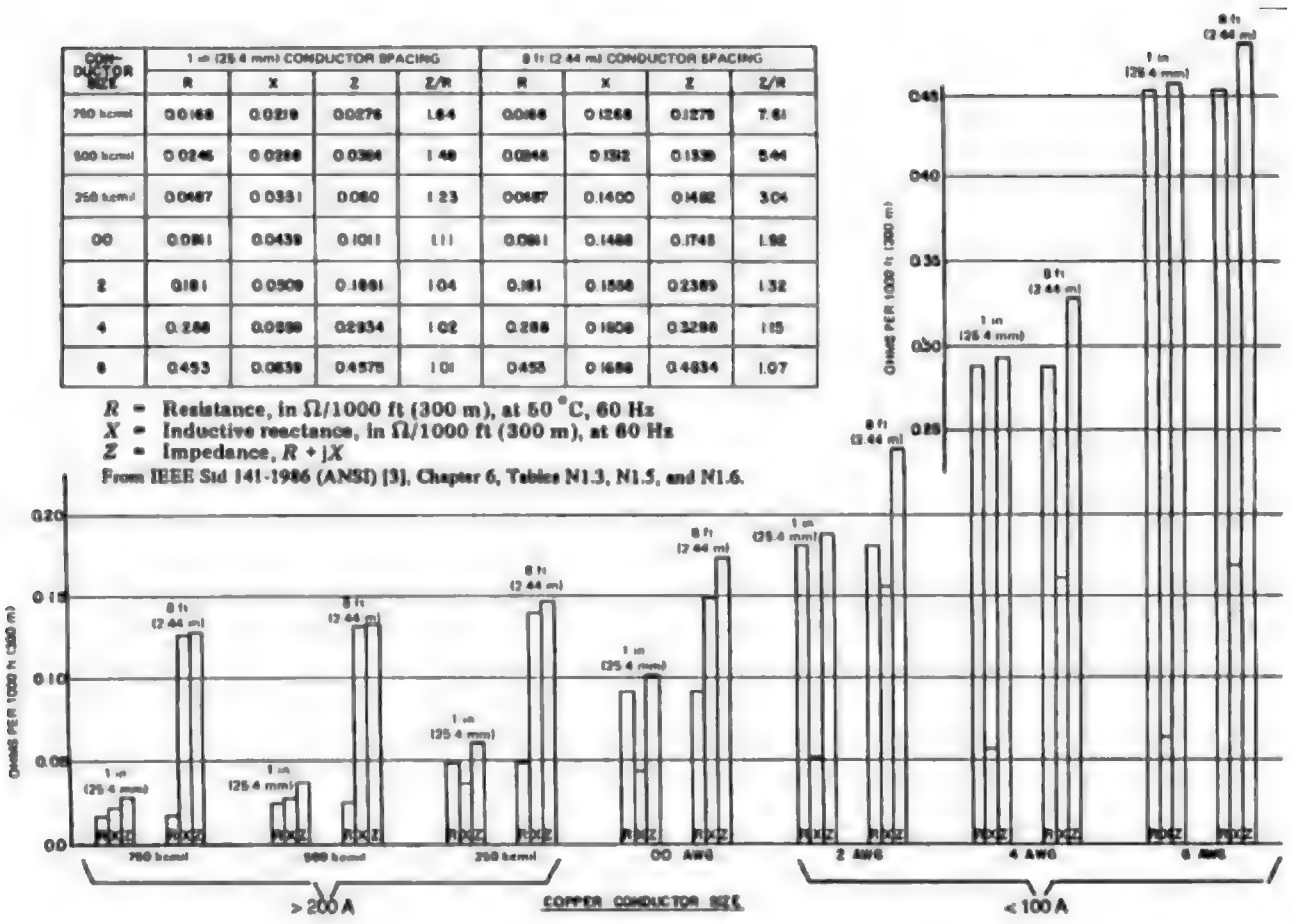

R = Resistance, in Ω/1000 ft (300 m), at 50 °C, 60 Hz
X = Inductive reactance, in Ω/1000 ft (300 m), at 60 Hz
Z = Impedance, R + jX
From IEEE Std 141-1986 (ANSI) [3], Chapter 6, Tables N1.3, N1.5, and N1.6.
OHMS PER 1000 ft (300 m)
COPPER CONDUCTOR SIZE
> 200 A
< 100 A
00 AWG
2 AWG
4 AWG

FIGURA 28 Variación de R y X con el tamaño del conductor y con el espaciamiento

La reactancia de un circuito en corriente alterna está determinada, principalmente, por el espaciamiento entre el conductor de ida y el de retorno, y depende muy poco del tamaño del conductor. Pero la resistencia sí depende directamente del tamaño del conductor, por lo tanto, la relación X / R y el efecto relativo de la reactancia sobre la impedancia del circuito aumenta, según aumenta el tamaño del conductor

NOTA.- Al aumentar la separación entre los conductores de puesta a tierra y de fase, se aumenta, no sólo la reactancia X_g del conductor de puesta a tierra, sino que también, la reactancia de secuencia cero X_0 de los conductores de fase.

En un circuito de corriente continua, la división de corrientes entre trayectorias en paralelo es inversamente proporcional a la resistencia. Los conductores de puesta a tierra, con poca capacidad de conducción de corriente (alta resistencia), llevan relativamente poco de la corriente total de falla a tierra. Los conceptos de diseño con gran número de conductores de puesta a tierra, proceden de los días de los sistemas de potencia de corriente continua.

En los circuitos de corriente alterna de 60 HZ, con capacidad arriba de 40 amperios, es obligación que el conductor de puesta a tierra con capacidad adecuada, se coloque físicamente, de tal forma que ofrezca mucha menor reactancia, que cualquier otra trayectoria de menor capacidad. La forma en que se logra esto la veremos en la sección 2.2

Un requisito importante, del circuito del conductor de puesta a tierra, es que las uniones y terminales en este conductor, tengan la capacidad de conducción de corriente de tiempo corto que se necesita para el conductor de puesta a tierra.

La falla por poner uniones o terminales inadecuados no aparece inmediatamente, porque este circuito no trabaja para demostrar su capacidad sino es hasta que ocurre la primera falla a tierra, en el circuito en cuestión.

2.1.4 CONSERVACION DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA: el conductor de puesta a tierra debe retornar la corriente de falla a tierra, sin introducir suficiente impedancia adicional, a tal extremo que se impidiera el comportamiento normal del sistema de protección.

Podemos interpretar, que el requisito quiere decir que la mayor impedancia del circuito de puesta a tierra que podemos aceptar, dependerá de que el sistema de protección de sobrecorriente se rediseñe, sin perjudicar sus propiedades de operación. Al cumplir este requisito podemos lograr otras metas importantes.

2.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.2.1 CONDUCTOR SENCILLO COMO CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA: para comprender el comportamiento de un conductor sencillo, usemos la Fig. 29. El conductor de puesta a tierra está unido al conductor aterrizado de la fuente, a la estructura del edificio y al electrodo de puesta a tierra en el extremo de la fuente del circuito.

Para estudiar las propiedades, únicamente del conductor de puesta a tierra, lo vamos a considerar sin contacto con la estructura del edificio, en toda su longitud de 200 pies (61 metros).

Imaginemos que el circuito tiene capacidad de 350 amperios y los conductores de fase son de 500 MCM (235.35 mm2) y el conductor de aterrizaje es 4/0 (107.16 mm2), de cobre a 25ºC.

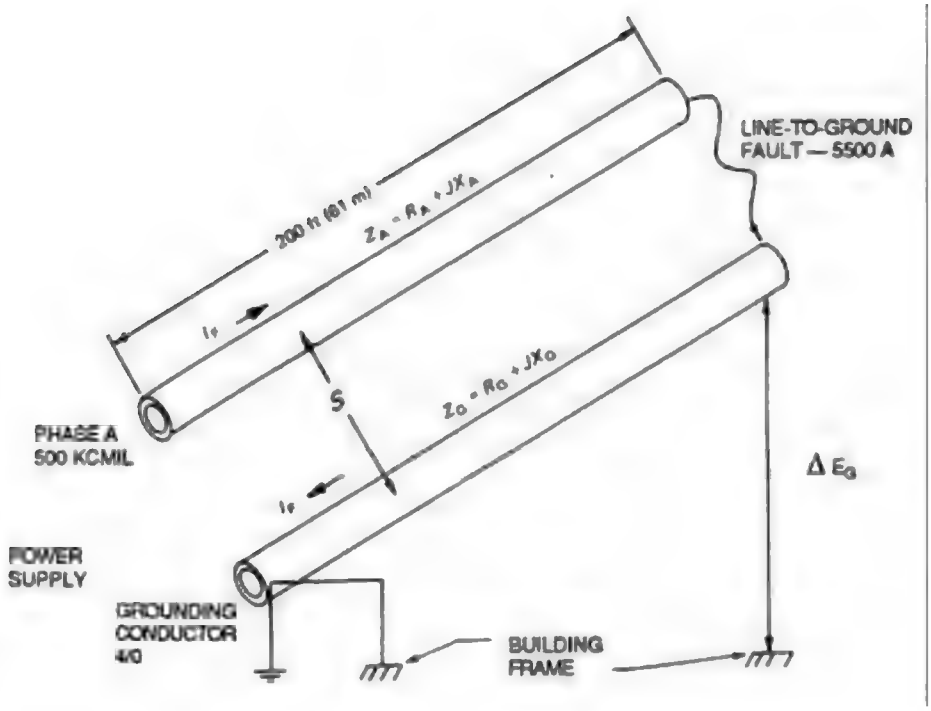


FIGURA 29 Conductor sencillo como conductor de aterrizaje

Supongamos que la corriente de falla de línea a tierra, en el otro terminal, es de 5,500 amperios. Consideremos tres condiciones de espaciamiento entre las fases y el conductor de aterrizaje: 2, 8 y 30 pulgadas (51, 203 y 762 mm). Los valores de impedancia, en 60 HZ, para la fase y para el conductor de tierra (en ohmios para 200 pies) son:

T A B L A 1

	ESPACIAMIENTO EN pulgadas	milímetros	R Ω	X Ω	Z Ω
CONDUCTOR DE FASE A	2	51	0.0049	0.0085	0.0098
	8	203	0.0049	0.0149	0.0157
	30	762	0.0049	0.0210	0.0216
CONDUCTOR DE TIERRA G	2	51	0.0115	0.0108	0.0158
	8	203	0.0115	0.0172	0.0207
	30	762	0.0115	0.0233	0.0260

La caída de voltaje ($I_F Z_G$) de la Fig. 29, a lo largo del conductor de tierra, aparece como choque de golpe eléctrico en el extremo alejado del conductor de tierra. Con el valor supuesto de I_F igual a 5,500 amperios, la exposición a los voltajes de choque para cada espaciamiento son:

T A B L A 2		
ESPACIAMIENTO		ΔE_G
pulgadas	milímetros	voltios
2	51	86.9
8	203	113.9
30	762	143.0

El cambio en el espaciamiento también cambia la reactancia del conductor de fase (relativa al conductor de aterrizaje). Los valores correspondientes a la caída de voltaje en el conductor de fase (para los mismos 5,500 amperios) para cada espaciamiento son:

T A B L A 3		
ESPACIAMIENTO		CAIDA IZ fase A
pulgadas	milímetros	voltios
2	51	52.8
8	203	85.8
30	762	118.3

Un cambio en la posición del conductor de aterrizaje cambia la reactancia en el conductor de fase. Este hecho nos lleva directamente al siguiente concepto importante. Aunque los diagramas de impedancia muestran tanto la resistencia como la reactancia, como propiedades del conductor, de hecho, la reactancia es una propiedad del espacio de campo electromagnético que circunda al conductor.

Para la Fig. 29, el campo magnético responsable de la caída de voltaje reactivo tiene la forma presentada en la Fig. 30.

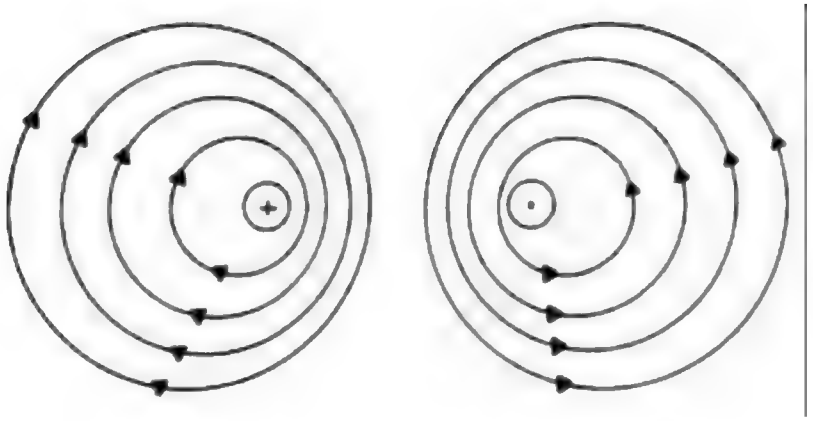


FIGURA 30 Campo magnético de un conductor trabajando como conductor de aterrizaje

En el espacio entre los conductores (8 pulgadas ó 203 mm) y para toda la longitud de 200 pies (61 m), existe un campo magnético de 60 HZ, con una fuerza magnetomotriz de 5,500 ampere-vuelta. Esto es un electromagneto enorme. La parte de campo magnético que enlaza al conductor de tierra, está asociada con la reactancia del conductor de tierra, y la parte que enlaza al conductor de fase, está asociada con la reactancia del conductor de fase.

Cualquier lazo de material conductor (alambre, ducto, cable mensajero, estructura de acero, etc.) que enlace parte de este campo magnético, recibirá un voltaje inducido proporcional a la fracción de flujo que enlace, como parte de la caída de voltaje reactivo del lazo del circuito principal de potencia. No se necesita contacto físico entre los dos lazos. El acoplamiento mutuo es totalmente magnético. Si el lazo está cerrado, tendremos una corriente circulante de cortocircuito.

La Fig. 31 ilustra un lazo posible, a un lado del conductor de tierra. Si este lazo está abierto en un extremo, el voltaje generado sería de 1.65 voltios, para 2 pulgadas (51 mm), ó 5.61 voltios para un espaciamiento de 30 pulgadas (762 mm).

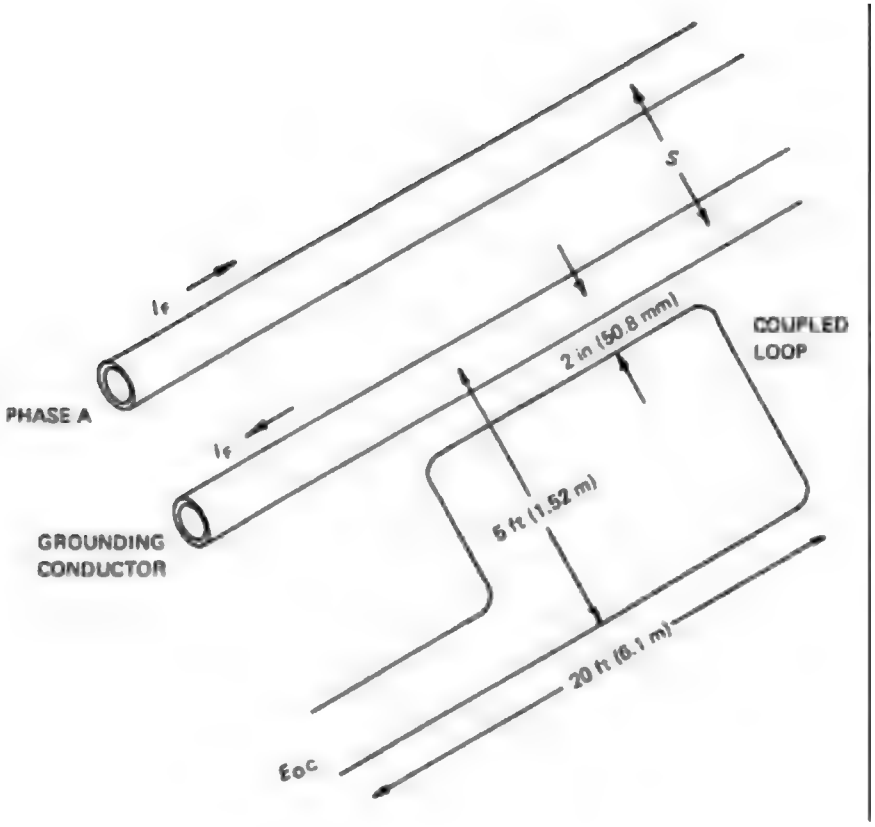


FIGURA 31 Inducción electromagnética de un alambre como conductor de aterrizaje

Si este lazo se cierra, los enlaces de flujo se reducirían casi a cero y la corriente inducida tomaría un valor suficiente y necesario para oponerse a los enlaces de flujo que entran. En el caso que hemos ilustrado, la corriente sería del orden de 500 amperios.

Aunque el voltaje de este lazo no parece peligroso, el peligro es el arco y destello que pudiera ocurrir en el punto en que el lazo se cierre suavemente, especialmente si hay materiales combustibles.

Si esto ocurriera en una estación externa, con corriente de falla de 50,000 amperios y para

espaciamiento de 6 pies (1.83 m), el voltaje sí será peligroso.

Podemos usar un aspecto útil de este efecto para reducir la reactancia en condiciones molestas. Si construimos un lazo cerrado, sin conexiones falsas, colocado para bloquear el paso de enlaces de flujo responsables de alguna reactancia molesta, podemos eliminar esta reactancia.

Por ejemplo, consideremos un circuito de corriente alterna con corriente alta, temporalmente, que debe pasar por una pared, a través de ductos de acero embebidos. Como los conductores son muy grandes, no pueden ir en un sólo ducto; entonces, se coloca un conductor en cada ducto. Con carga, la caída de voltaje es excesiva y el ducto se calienta. Un dictamen sería que la instalación no sirve. Pero, con el conocimiento que hemos desarrollado, podemos colocar o instalar un lazo en cortocircuito que quitaría la reactancia indeseable y eliminaría el calentamiento del ducto.

Colocando un cable desnudo de cobre (algún desperdicio) alrededor de cada uno de los ductos, hasta que se cubran todos y finalmente cerrando este lazo al unir todos los terminales. La reactancia del circuito será menor que si todos los conductores fueran al aire, en todo el tramo. Habrá una resistencia pequeña extra, producida por la circulación de corriente en el lazo cortocircuitado.

Los factores claves en el peligro de choque por voltaje, en el conductor de puesta a tierra, son: sección transversal del conductor de puesta a tierra, espaciamiento de los conductores de fase, magnitud de la corriente de falla a tierra y longitud del circuito.

En las instalaciones corrientes, el conductor de puesta a tierra se conecta a la estructura del edificio, a intervalos regulares. La primera impresión es que así desaparece el peligro de exposición a voltajes de choque.

La explicación correcta es que el voltaje que vimos que existe en el conductor de puesta a tierra, se aplica a la estructura del edificio.

En el punto de conexión, la diferencia de potencial se reduce a cero. Conectando en la entrada del equipo a la estructura del edificio, se establece la diferencia de potencial cero. Por lo tanto, la caída de voltaje en la estructura del edificio se iguala con la caída de voltaje a lo largo del conductor de puesta a tierra.

Sin embargo, aparecerán diferencias de potencial entre ciertos miembros de la estructura que son más serias que la original.

Resulta muy complicado determinar qué diferencias de voltaje aparecerán entre determinados puntos de la estructura.

Una aproximación sería que comencemos por evaluar la exposición a voltaje que podría existir si el conductor de puesta a tierra actúa sólo. Así, se establece la calidad del diseño e identifica la máxima diferencia de voltaje que podría aparecer en la estructura del edificio.

Pero, las conexiones del conductor de puesta a tierra hacia la estructura del edificio, disminuyen un poco la magnitud del voltaje a lo largo del conductor de puesta a tierra. Esta caída es importante en circuitos de capacidad baja.

2.2.2 CABLEADO DE CONDUCTORES: cableando los conductores, el espacio entre las fases y el conductor de puesta a tierra se reduce, hasta poner en contacto directo los aislamientos. Con las mismas condiciones de la Fig. 29, la reactancia se puede reducir hasta 0.0061, para el conductor de tierra y 0.0038 para el conductor de fase.

Si se distribuye la sección transversal total del conductor de puesta a tierra, entre los intersticios del cable de tres conductores (un tercio del conductor en cada cubierta) se puede reducir sustancialmente la reactancia efectiva del conductor de tierra.

2.2.3 ENCERRANDO EN DUCTO METALICO: si el conductor de puesta a tierra toma la forma de tubo, y dentro de él colocamos los conductores de fase y el neutro, se mejora la efectividad. La corriente de falla a tierra se distribuye de tal forma, que resulta una reducción en la caída de voltaje de ida y vuelta (Fig. 32)

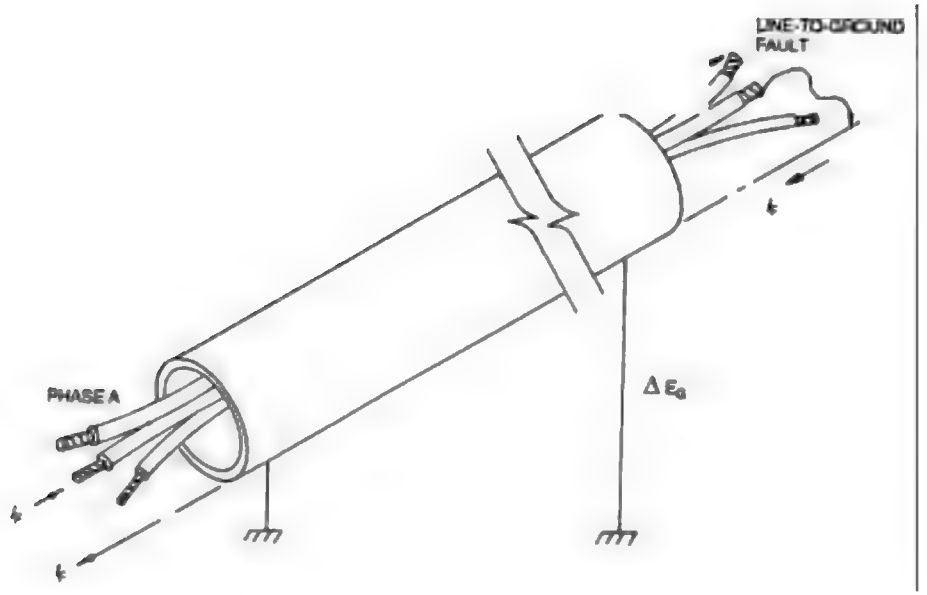


FIGURA 32 Ductería trabajando como conductor de aterrizaje

Durante una falla a tierra se comporta como cable coaxial. Excepto por la resistividad del ducto, todos los campos eléctricos y magnéticos quedan dentro del ducto. El campo magnético externo es cero.

Se debe tener cuidado en las uniones de los ductos con los terminales. La circulación de la corriente de falla en el ducto provoca un gradiente de voltaje, a lo largo del conductor de puesta a tierra (que es el ducto). Se tienen datos de diferentes tipos de ductos para conductores de fase desde #12 AWG (3.31 mm^2) hasta 500 MCM (253.35 mm^2).

Los resultados se presentan en términos de la caída de voltaje a lo largo del ducto exterior por cada 1,000 amperios de corriente de falla y por cada 100 pies (30.5 m) de longitud del circuito (TABLA 4)

Se puede ver que el ducto rígido (conduit) es el que tiene el comportamiento mejor, especialmente, por el espesor de las paredes. El contraste entre ducto de acero y de aluminio es interesante y ofrece ventajas en aplicaciones específicas.

TABLA 4 Caída de voltaje de los conductores en

Conductor Size	Cable or Conduit	DC Resistance Ω/100 ft	Computed IR Drop V/1000 A/ 100 ft	Measured Drop V/1000 A/ 100 ft
500 kcmil	3/C VCI (steel armor)	0.0383	38.3	35
500 kcmil	3/C VCI (steel armor with internal grounding conductor)	—	—	5
#4/0	3/C VCI (aluminum armor)	0.288	286.0	151
#4/0	3/C VCI (aluminum armor with internal grounding conductor)	—	—	12
#4/0	3/C VCI (steel armor)	—	—	55
#4/0	3/C VCI (steel armor with internal grounding conductor)	—	—	11
#4/0	3/C lead sheath (15 kV)	0.00263	2.63	11
#4/0	4" rigid steel conduit	0.0025	2.5	1
#2/0	2" rigid steel conduit	0.0095	9.5	6
#1/0	3/C VCI (steel armor)	0.0458	45.8	51
#1/0	3/C VCI (steel armor with internal grounding conductor)	—	—	19
#2	aluminum sheath (solid sheath M/C cable)	0.01	10.0	9
#2	1 1/4" rigid steel	0.0108	10.8	11
#2	1 1/4" EMT	0.0205	20.5	22
#2	1 1/4" Greenfield (flexible metal conduit)	0.435	435.0	436
#8	3/4" rigid steel	0.02	20.0	21
#8	3/4" EMT	0.0517	51.7	48
#8	3/4" greenfield (flexible metal conduit)	1.28	1280.0	1000
#10	aluminum sheath (solid sheath MC Cable)	0.015	15.0	16
#12	1/2" rigid steel	0.0223	22.3	25
#12	1/2" EMT	0.0706	70.6	70
#12	BX without ground (AC cable)	1.79**	1790.0	1543

*Value read from bar chart (numeric values not published).
**Does not meet current Underwriters Laboratories' listing requirements.

Cable o Conduit

La permeabilidad magnética alta del acero contribuye a aumentar la impedancia de la falla de línea a tierra. A primera vista se podría creer que la caída de voltaje se incrementaría, pero sucede exactamente lo contrario.

El efecto del material magnético en las paredes del ducto es que confina la corriente grande de retorno, en la cara interna del ducto, penetrando a la superficie exterior sólo cuando ocurre la saturación magnética del hierro.

La tabla siguiente ilustra las mejoras que se obtienen con las diferentes formas de los conductores de puesta a tierra. Se mantienen las condiciones de la Fig. 29, excepto por el tamaño del conductor de puesta a tierra y por su forma. Mantenemos constante la corriente de falla, I_F, en 5,500 amperios. El espaciamiento de 30 pulgadas (762 mm) queda como referencia:

T A B L A 5

CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA	EXPOSICION AL VOLTAJE E_G (voltios)
4/0 (107.16 mm2) de cobre espaciado 30 pulgadas (762 mm)	151.3
4/0 (107.16 mm2) de aluminio espaciado 8 pulgadas (203 mm)	124.3
4/0 (107.16 mm2) de cobre espaciado 2 pulgadas (51 mm)	100.1
cable de 3 conductores 4/0 total (107.16 mm2)	70.4

Si el conductor de puesta a tierra es el ducto que encierra a los conductores de fase, el peligro de voltaje E_G se reduce hasta 6.7 voltios para aluminio rígido y a 11 voltios para ducto rígido de acero. Es importante que se evite el uso de ductos que tengan capacidad de conducción de corriente de tiempo corto inadecuada, a menos que se complemente con un conductor adicional de puesta a tierra y adecuado dentro del ducto. Las juntas de los ductos deben ser eléctricamente buenas.

2.2.4 COMPONENTES DE LA IMPEDANCIA DEL CIRCUITO: la expresión general para la corriente de falla de línea a tierra, en un sistema trifásico es:

$$I_F = (3\ E_A) / (Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3\ Z_G)$$

Las impedancias de secuencia positiva (Z_1) y de secuencia negativa (Z_2) están activas sólo en los conductores de fase que salen, ya que las corrientes de esas dos secuencias se combinan a cero en el lugar de falla. Sin embargo, la corriente de secuencia cero I_0 está en fase en las tres fases. Las tres corrientes de secuencia cero retornan colectivamente por el conductor de puesta a tierra.

Quiere decir que la circulación de la corriente de secuencia cero involucra una caída de voltaje ($I_0\ Z_0$) para transmitir la corriente en los conductores de fase y de ($3\ I_0\ Z_G$) para retornar la corriente en el conductor de puesta a tierra. Se debe considerar correctamente estas impedancias en la red de secuencia cero: $I_0\ (Z_0 + 3\ Z_G)$

Los resultados de las pruebas demuestran claramente el hecho de que la impedancia de la trayectoria total ($Z_0 + 3\ Z_G$) es mucho mayor que Z_0, por lo que la parte del voltaje de secuencia cero de la trayectoria total, que aparece a lo largo de la ductería exterior, es una parte pequeña de $I_0\ (Z_0 + 3\ Z_G)$.

No hay forma sencilla de separar Z_0 de Z_G. Lo importante es reconocer que ambos términos existen y que si usamos sólo Z_0 podemos cometer un gran error.

La relación $[(Z_0 + 3\ Z_G) / Z_1]$ se puede mantener baja, poniendo un retorno de tierra de impedancia baja, Z_G. Esto se puede lograr usando conductores de puesta a tierra o barras, o ambos, en ductos, cables, barras y equipos y conectándolos a la estructura de acero, a los encerramientos metálicos y a tierra.

A veces, erróneamente se cree que la conexión múltiple de los retornos de tierra al acero del edificio sólo tiene resultados positivos. Los beneficios son:

(1) No hay peligro de voltaje en el sitio de la conexión del acero del edificio
(2) Existe un retorno pos si acaso se rompe el retorno de diseño

Sin embargo, pueden existir las siguientes desventajas potenciales:

(1) La diversidad de retornos de corriente podría producir ruptura de las juntas de acero del edificio, que no se diseñaron como conductor eléctrico
(2) El retorno de corriente que no está cerca del conductor de fase fallada incrementará la reactancia del conductor de fase y del neutro
(3) El voltaje de falla se aplicará a la estructura del edificio y si no se distribuye uniformemente, por las juntas de impedancia alta, pueden resultar potenciales peligrosos

2.2.5 SUPRESION DE INTERFERENCIA ELECTROMAGNETICA: al desarrollar los patrones fundamentales de comportamiento de las diferentes formas de los conductores de puesta a tierra, observamos la habilidad para suprimir la magnitud de los campos eléctricos y magnéticos, en el espacio externo al canal de potencia eléctrica, ocupando métodos apropiados de diseño.

Podemos utilizar este conocimiento para que el conductor de puesta a tierra de los circuitos sirva para reducir, apreciablemente, el "ruido eléctrico" que aparece en el espacio que circunda las corridas eléctricas.

Como podemos esperar, el ducto es mejor que los conductores discretos. Los ductos de acero son muy efectivos para suprimir campos eléctricos fuertes. Podemos necesitar conductancias elevadas para lograr niveles bajos de ruido.

El incremento acelerado en el uso de los circuitos digitales de transmisión de datos de bajo nivel de energía, en combinación con el incremento en los niveles de ruido de los circuitos de potencia, debido a la modulación en tiempo de los recortadores de corriente, generalmente SCRs (rectificadores controlados de silicio), en aparatos de calentamiento, de control de alumbrado, de control de velocidad de motores, etc., enfatiza la importancia de suprimir las interferencias electromagnéticas.

2.2.6 UNION DE LAS CUBIERTAS DE METAL AL CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA: el patrón de comportamiento de un conductor de puesta a tierra independiente (como el que se lleva al electrodo de puesta a tierra en la entrada de servicio o el conductor de puesta a tierra que conecta un pararrayos a algún terminal de tierra) es muy diferente al de un conductor de puesta a tierra de un circuito de potencia (Fig. 33)

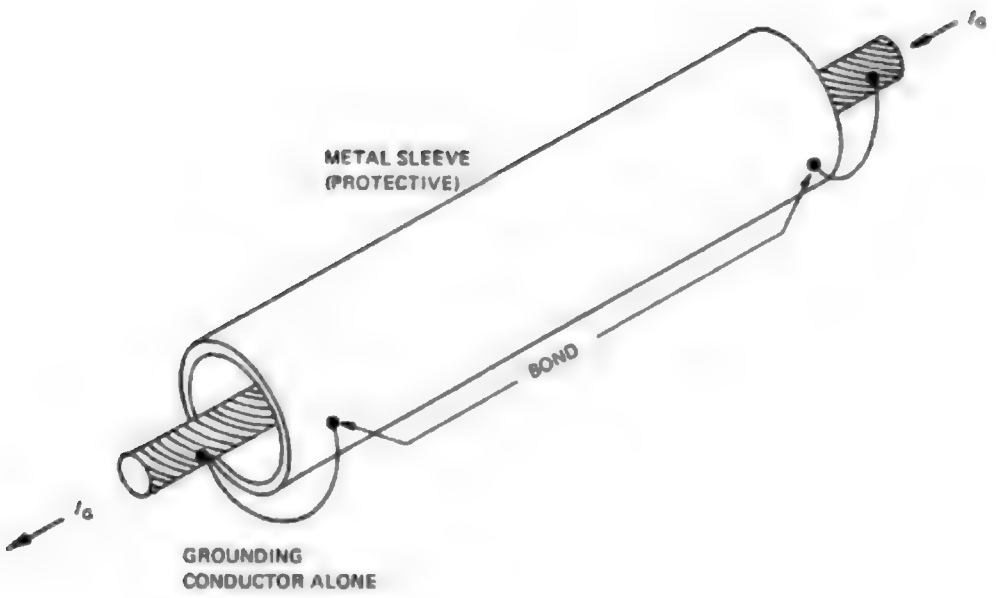


FIGURA 33 Unión de las chaquetas metálicas

En este caso, la función es conducir la corriente, en una sola vía, a un electrodo de puesta a tierra o a TIERRA.

En el caso de la corriente de descarga, la trayectoria de retorno puede estar tan lejos como obscura. Habrá una caída de voltaje inductivo a lo largo del conductor, debida al cambio en la corriente (L di/dt) ó bien (X_L I_{ac}).

Mientras mayor es el diámetro del conductor, menor será su inductancia o reactancia. Si el elemento que encierra al conductor es magnético, se aumentará el campo magnético que circunda al conductor, lo cual incrementará la caída inductiva de voltaje correspondiente.

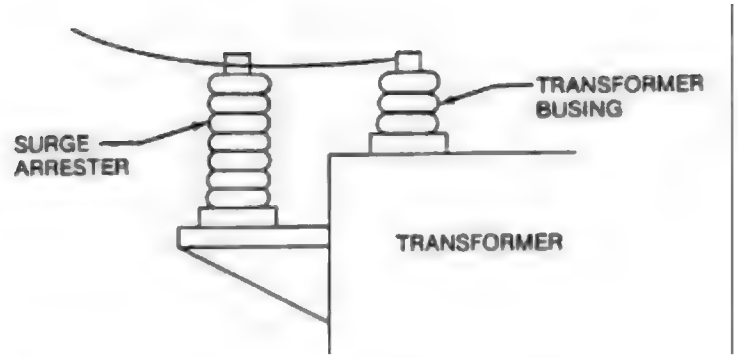
En algunos casos, las condiciones de la instalación son tales, que obligan a colocar envolturas metálicas de este tipo, sobre alguna parte del conductor de puesta a tierra. En todos los casos, se debe unir el conductor y la cubierta metálica protectora en ambos extremos de cada sección entera de la cubierta, por las siguientes razones:

(1) Evitar el incremento en la caída de voltaje, si la cubierta es de material magnético

(2) Aprovechar la reducción en caída de voltaje asociada con conductores de diámetro grande

(3) Permitir que el conduit de acero lleve la mayor parte de la corriente esperada

2.2.7 CONEXIONES DE PUESTA A TIERRA ASOCIADAS CON EQUIPO DE PROTECCION CONTRA VOLTAJE DE FRENTE DE ONDA ESCARPADO: el uso de pararrayos para transformadores (Fig. 34) y capacitores protectores de pulsos y pararrayos para máquinas giratorias, ilustran esta aplicación del conductor de puesta a tierra (Fig. 35)



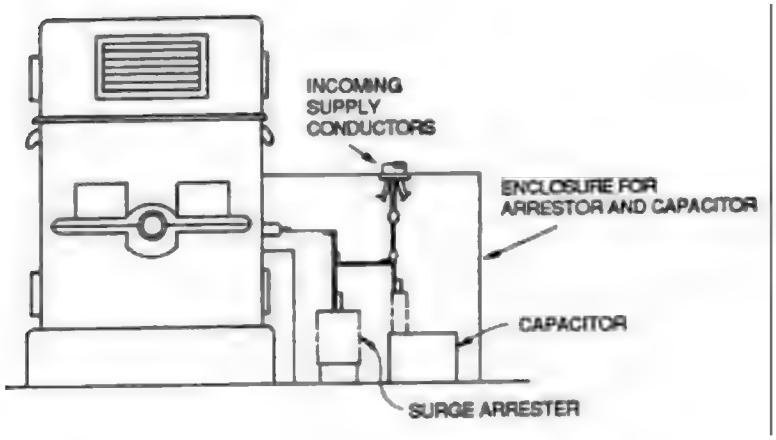


FIGURA 34 Localización del pararrayos en un transformador

FIGURA 35 Equipo de protección contra descargas en un motor (sólo una fase)

La función del conductor de puesta a tierra es proveer una trayectoria para que el pulso de corriente se pueda derivar, sin que pase por el aparato que se está protegiendo y sin desarrollar magnitudes peligrosas de voltaje.

En presencia del cambio de corriente (di/dt) habrá una caída inductiva de voltaje, desarrollada a lo largo del conductor de puesta a tierra, que se agrega al voltaje del equipo de protección. La cantidad que se agrega será proporcional a la longitud del conductor y al espaciamiento desde el aparato que se protege y, por supuesto, a la magnitud de di/dt.

Los valores reales de di/dt varían en un rango amplio, pero podemos tomar 10 KA/μseg.

En estas condiciones, una inductancia de 1 μH será significativa:

$$E = L\ di/dt = (10^{-6})\ (10{,}000)\ (10^{6}) = 10{,}000 \text{ voltios}$$

Un microhenry equivale a 0.000377 ohmios en 60 HZ.

Necesitaríamos sólo 3 pies (0.91 m) de conductor 4/0 (107.16 mm^2), a una distancia de 5 pies (1.52 m), desde el transformador, para agregar 10,000 voltios al voltaje del pararrayo de la Fig. 34. Esto quiere decir, que la longitud del conductor y el espaciamiento tienen una importancia grande.

Podemos ver que el voltaje se genera por todos los enlaces de flujo que se desarrollan en la ventana entre el conductor de tierra y el aparato que se protege.

Para aprovechar todas las ventajas de las propiedades de protección del pararrayos, en la Fig. 34, se debe colocar directamente en el "bushing". En voltaje bajo se puede usar un brazo que sale directamente debajo del "bushing". En voltaje alto se usa una aleta que sale del cuerpo del tanque.

Lo mismo se hace para proteger las máquinas giratorias, se unen las estructuras de la máquina y del montaje. En este caso, es más importante el capacitor, si se conecta directamente y con terminales cortos, la velocidad de elevación del voltaje, en los terminales del motor, se puede mantener baja y necesitaría unos 10 microsegundos para alcanzar el voltaje de descarga del pararrayos. Esto nos permite que los terminales al pararrayos sean más largos.

2.2.8 CONEXION A TIERRA: en nuestra literatura técnica usamos dos términos: "ground" (tierra o masa) y "EARTH" (TIERRA o planeta) que se parecen mucho, pero que realmente no son lo mismo.

En español los distinguiremos por las minúsculas y las mayúsculas. El sistema eléctrico de un avión en vuelo tendrá una barra de tierra, conductor de puesta a tierra, etc., obviamente aquí no funciona TIERRA.

Para un electricista que trabaja en el décimo piso de un edificio, su referencia de tierra es la estructura del edificio, los equipos metálicos y el conjunto de conductores de puesta a tierra del sistema eléctrico que existe en su área de trabajo. El potencial de TIERRA no le interesa a este trabajador en el décimo piso.

Si el trabajador se traslada al primer piso, donde el concreto descansa sobre el suelo, o al suelo de una subestación abierta, su referencia apropiada de tierra es TIERRA; es su referencia para los peligros de choque por voltaje.

Por lo tanto, sólo a veces será TIERRA, pero siempre será el conductor metálico de puesta a tierra del circuito eléctrico.

En los párrafos siguientes veremos que el potencial de TIERRA puede ser muy diferente que el potencial del conductor de puesta a tierra. Por lo tanto, es muy importante que el peligro de voltaje se exprese con respecto a la referencia apropiada de tierra.

Todos los sistemas eléctricos, incluyendo los que se instalan en los vehículos espaciales, se pueden encontrar en situaciones en que las fuentes eléctricas buscan trayectorias a tierra.

Se pueden provocar daños serios en el equipo eléctrico o peligros de choque por voltaje, para las personas en el área, a menos que estas corrientes extraviadas o desviadas se deriven por trayectorias preparadas y apropiadas hacia una tierra de capacidad adecuada.

En la parte 4 de este curso veremos el comportamiento de los terminales de conexión a TIERRA. El principal propósito de esta discusión es desarrollar el concepto del gradiente de potencial que se forma cuando la corriente se descarga en la TIERRA y la forma en que se afecta el equipo de puesta a tierra.

En realidad, TIERRA es un conductor eléctrico pobre o malo, cuya resistividad es unas mil millones de veces mayor que la del cobre. Una varilla de 8 pies (2.44 m) y 3/4 de pulgada (19.05 mm) de diámetro, enterrada en TIERRA, puede representar una conexión a TIERRA de 25 ohmios.

Esta resistencia se forma por la combinación, en serie, de cilindros concéntricos de tierra y del mismo espesor. El cilindro interior es el que tiene la mayor resistencia, por lo tanto es el más importante. La mitad de los 25 ohmios estarán en un cilindro de 1 pie (0.3 m) de diámetro.

Por la misma razón, la mitad de la caída de voltaje que resulte de la inyección de corriente en este electrodo de tierra, podría aparecer entre los primeros 0.5 pies (0.15 m) de la superficie de la TIERRA, radialmente, desde el electrodo de tierra.

Si la corriente es de 1,000 amperios, el electrodo subiría su voltaje, con respecto al potencial de TIERRA, hasta:

$$(1{,}000)(25) = 25{,}000 \text{ voltios}$$

La mitad de este voltaje (12,500), aparecería como una caída de voltaje entre el electrodo y la TIERRA colocada a sólo 0.5 pies (0.15 m) desde el electrodo. Si una persona se para a 0.5 pies (0.15 m) y toca el electrodo, recibiría ese potencial.

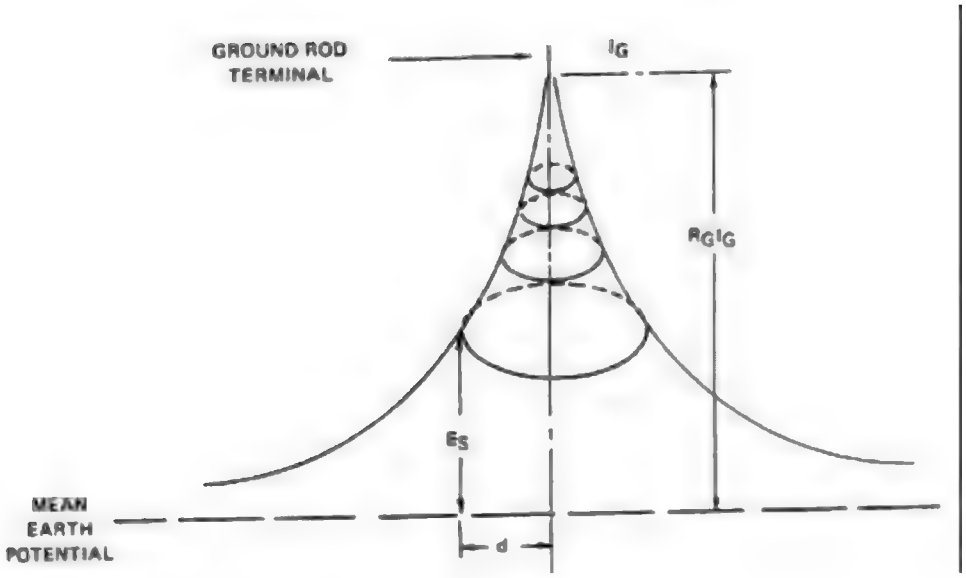
La Fig. 36 ilustra la distribución del potencial de TIERRA vrs. la distancia desde el electrodo. El valor central del pico sería el potencial del electrodo con referencia al potencial de una TIERRA lejana. El contorno de la mitad de voltaje estaría en un círculo de 1 pie (0.3 m) de diámetro.

Si tenemos una subestación de 50 pies (15.2 por 15.2 m), con 25 electrodos, uniformemente distribuidos, los patrones de gradiente de potencial se traslapan y la resistencia compuesta sería de 2 ohmios.

Una falla de línea a tierra puede producir una corriente de 10,000 amperios en el terminal de TIERRA, el contorno del mapa de voltaje tendría 25 picos de potencial de 20,000 voltios y entre los electrodos podríamos tener mínimos de voltaje de 2,000 a 5,000 voltios.

Este patrón de voltajes en el área de caminar por la subestación no sería aceptable, se tienen que usar alambres de puesta a tierra adicionales, enterrados a poca profundidad, para

elevar el potencial de la superficie de TIERRA entre los electrodos principales.



E_s = potencial de la superficie de Tierra
d = distancia radial desde la barra
R_G = resistencia de la barra a Tierra
I_G = corrientes de tierra entrando a la barra

FIGURA 36 Potencial de la superficie de tierra alrededor de una barra de tierra cuando fluye corriente

Pensemos en los conceptos de potencial: escalón, al tacto y transferidos. Se puede usar conductores de tierra adicionales, enterrados a poca profundidad, para ajustar el contorno de voltaje adyacente, pero afuera de la cerca o valla.

La seguridad se mejora colocando grava con buen drenaje, en el piso. En los interruptores de operación manual se colocan rejillas metálicas conectadas a la estructura metálica del interruptor, para asegurar que las manos del operador y sus pies estén al mismo potencial

2.3 INFLUENCIA SOBRE EL EQUIPO DE PUESTA A TIERRA, POR EL TIPO DE USO

Para nuestros fines, los principales tipos de uso son:

(1) Subestaciones exteriores de estructura abierta
(2) Subestaciones unitarias exteriores
(3) Equipo de servicio pesado portátil exterior, como: excavadoras, palas y dragas
(4) Sistemas de alambrado interior
(5) Subestaciones interiores y centros de conexión y desconexión (switcheo)

Los problemas que se le presentan al diseñador de equipos, para sistemas conectados a tierra, varían ampliamente, dependiendo de los diferentes tipos de uso; pero el objetivo básico es el mismo.

El equipo del sistema de puesta a tierra debe soportar el flujo de corriente (magnitud y duración) que se le aplica durante la operación normal del sistema. Este esfuerzo generalmente produce la falla entre un conductor con energía y la estructura metálica conductora que le sostiene o que lo encierra.

Pero también se puede producir por alguna inyección externa de corriente, como en las descargas eléctricas o en el contacto con el cable de guarda. Los equipos del sistema de puesta a tierra deben soportar esta corriente sin provocar peligros de choques eléctricos por voltaje para las personas en el área.

2.4 SUBESTACIONES EXTERIORES DE ESTRUCTURA ABIERTA

2.4.1 GENERALIDADES: por la naturaleza distribuida de las subestaciones exteriores de estructura abierta típicas, Fig. 37, se presentan algunos de los problemas más complejos en el equipo de aterrizaje.

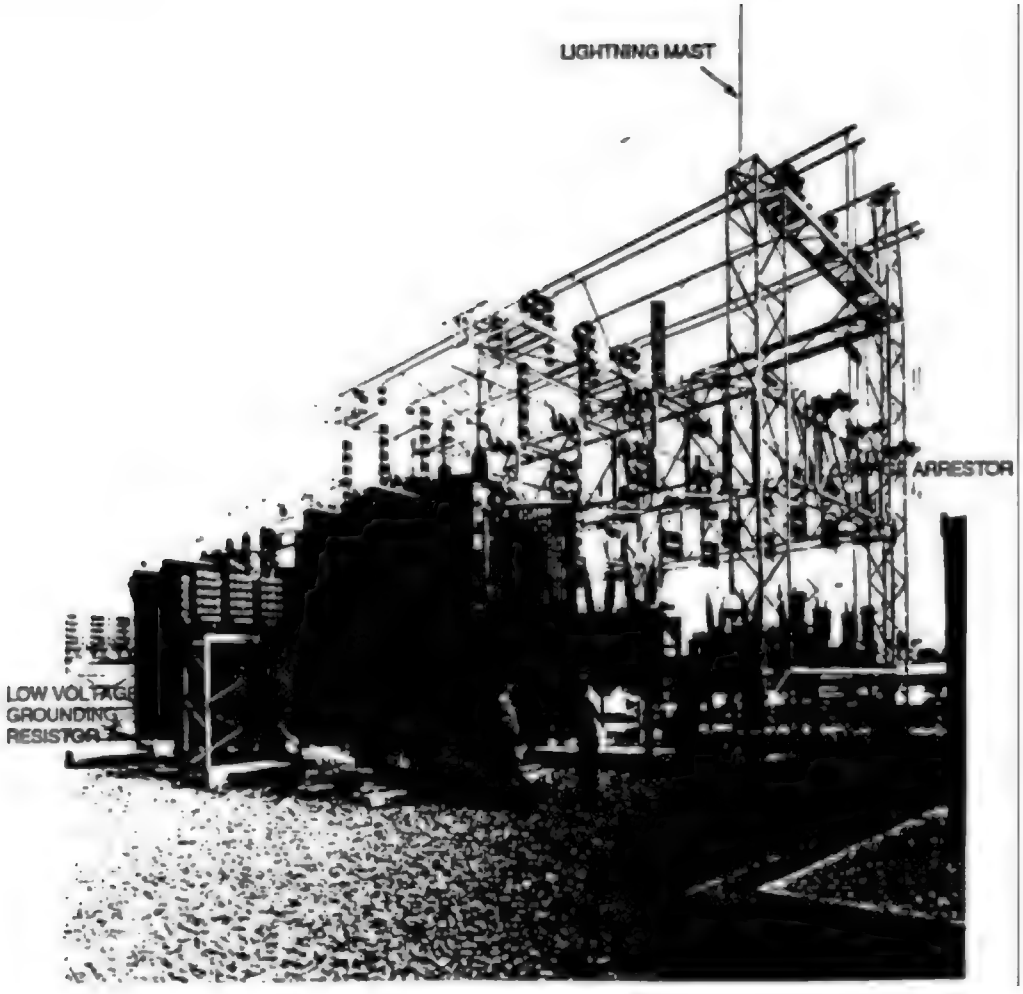


FIGURA 37 Subestación exterior de estructura abierta mostrando los postes de alumbrado, pararrayos y resistencias de aterrizaje del lado de bajo voltaje

Es muy común que algunas partes de los aparatos grandes parezcan como instalaciones "islas" dentro del área de la subestación. Para cualquier equipo, el esfuerzo del voltaje que se aplica sobre su aislamiento depende de la diferencia de potencial entre sus terminales eléctricos y la estructura o cubierta metálica que encierra sus partes activas.

La magnitud del peligro de choque eléctrico para una persona de operación o mantenimiento, dentro del área de la subestación, será función de la diferencia de potencial entre la superficie de tierra sobre la cual se para la persona y el metal que la persona toca normalmente, como las estructuras de aparatos y subestaciones.

Para una persona que se acerca a la valla, dependerá de la forma del gradiente de potencial sobre la superficie de la tierra, en los contornos adyacentes a la valla, del lado exterior de la subestación.

2.4.2 DISEÑO DE AVENIDAS PARA FLUJO DE CORRIENTE DE FALLA A TIERRA: esta habilidad para conducir la corriente de falla a tierra, desde el punto donde entra a la estación hasta donde sale, se complementa con la estructura metálica de la subestación y con un arreglo de conductores de aterrizaje interconectados con las bases de las estructuras hasta las islas de los aparatos, por trayectorias apropiadas.

Generalmente se usa alambre de cobre, desde 2/0 AWG (70.1 mm^2) para las pequeñas, hasta 500 MCM (253.35 mm^2) para las grandes. Es importante que tenga capacidad efectiva para la corriente de tiempo corto que no sea menor que el 25% de la corriente del conductor de fase. Pero, en cualquier caso, debe ser capaz de llevar la corriente de cortocircuito de línea a tierra (magnitud y duración) que se permite en el sistema de protección de sobrecorriente, sin provocar daño térmico.

CONDUCTOR DEL ELECTRODO DE ATERRIZAJE PARA SISTEMAS DE C.A.

Tamaño del conductor más grande en entrada de servicio o área equivalente para conductores en paralelo		Tamaño del conductor del electrodo de aterrizaje	
Cobre	Aluminio ó Al/Cu	Cobre	Aluminio o Al/Cu
2 ó menor	0 ó menor	8	6
1 ó 0	2/0 ó 3/0	6	4
2/0 ó 3/0	4/0 ó 250 MCM	4	2
3/0 hasta 350 MCM	250 MCM - 500 MCM	2	0
350 MCM - 600 MCM	500 MCM - 900 MCM	0	3/0
600 MCM - 1,100 MCM	900 - 1,750 MCM	2/0	4/0
Sobre 1,100 MCM	sobre 1,750 MCM	3/0	250 MCM

TABLA 250-94

El trazo del conductor de aterrizaje debe tratar de reducir la distancia de separación entre él y los conductores de fase. Al construir las estructuras metálicas de varias bases o islas, se forman mallas cortocircuitadas, con los conductores de aterrizaje de las bases, que pueden limitar, efectivamente, la reactancia del circuito a tierra, en comparación con otras

instalaciones más amplias.

Los conductores de aterrizaje dimensionados y trazados con las mismas reglas, deben llegar hasta todos los puntos que necesitan aterrizaje, como el neutro de los transformadores de potencia que se deben aterrizar o el neutro de los transformadores de aterrizaje.

Cuando los empalmes quedan cubiertos se deben hacer, preferentemente, con soldadura térmica (Fig. 38). Si quedan expuestos, se deben ocupar juntas y terminales adecuados.

Si el cable de guarda sólo llega a los bordes de la subestación y el conductor de fase continúa hacia dentro, en el punto en que la fase baja a los aparatos, se debe colocar un conductor de tierra dimensionado apropiadamente y elevado verticalmente para que siempre exista una trayectoria a tierra, razonablemente cerca de la ruta de los conductores de fase.

Es muy importante que el sistema de conductores de aterrizaje llegue y se conecte a las estructuras de las islas que se encuentren dentro de la subestación.

FIGURA 38 Junta soldada térmicamente en un conductor subterráneo de aterrizaje

2.4.3 DISEÑO DE CONEXIONES A TIERRA (PLANETA)

Uno de los objetivos importantes del diseño es lograr un determinado grado o nivel de conexión a TIERRA. Esto involucra varias conexiones a TIERRA (electrodos de aterrizaje) distribuidas dentro del área de la subestación. Si los electrodos individuales de aterrizaje no se separan físicamente lo suficiente, se desmejorará su efectividad.

Un límite específico de diseño puede ser el voltaje máximo permisible en la estructura de la subestación (relativo al significado de potencial de TIERRA), debido a una falla de línea a tierra del sistema de potencia o a una descarga eléctrica.

Todos los circuitos de señalización y de comunicación que salen de la estación, hacia lugares remotos, se deben diseñar para soportar este voltaje sin daños.

El voltaje en las estructuras de la estación se limita por el voltaje nominal de los circuitos de potencia que entran a la estación. Por ejemplo, si una estación tiene un circuito principal con un voltaje de 230 kV, pero también tiene circuitos de 4.16 kV, un voltaje de 25 kV no daría problemas en 230 kV, pero sería desastroso para los elementos del sistema de 4.16 KV. No se podría aprovechar ni el mejor de los pararrayos en los circuitos de 4.16 kV; ese voltaje excesivo los destruiría, quizás abriendo el circuito. Por lo tanto, se debe determinar el voltaje máximo permisible y luego proceder a diseñar los sistemas de conexión a tierra de la estación.

Después veremos la efectividad del acero reforzado que llevan las fundaciones funcionando como electrodos de aterrizaje. Todas las especificaciones de diseño de las estaciones actuales exigen conexión entre las placas de las bases de las torres y las barras de refuerzo de las fundaciones, lo cual se puede lograr sujetando con pernos J.

Si el suelo de la estación tiende a ser electrolito activo, como cenizas, al usar metales diferentes como cobre y acero, en los electrodos de aterrizaje, unidos a la red o malla de conductores de aterrizaje de la estación, se puede producir deterioro electrolítico de los elementos de acero en las fundaciones.

Con el conocimiento moderno, este problema se puede evitar con mucha facilidad. Cuando el suelo es activo, la conexión a TIERRA necesaria se puede lograr sólo con los elementos de acero de las fundaciones que forman parte inherente de la estación. Si se necesitan electrodos adicionales, se hacen de acero. Si el suelo no es activo, no hay problema con la combinación de acero y cobre.

Los postes de alumbrado que sobresalen sobre los elementos estructurales de la estación pueden ser muy efectivos para interceptar las descargas eléctricas y descargar la corriente a TIERRA, sin relampagueo del aislamiento en la estación.

El relampagueo del aislamiento se evita aumentando los niveles en la estación, con lo cual sólo se producirán las descargas más intensas. Sin embargo, una instalación que reduce el número de incidentes al 60% se puede considerar inversión económica razonable o sensata.

2.4.4 EQUIPO DE PROTECCION CONTRA IMPULSOS DE VOLTAJE

Para que sean efectivos contra los transitorios de frente de onda rápido, se deben conectar en paralelo y muy cerca de los aparatos que protegen.

La presencia de las líneas aéreas que llegan a la estación, pero que terminan en un interruptor abierto o en "circuit breaker" abierto, promueve descargas o relampagueo en el terminal abierto, por la tendencia de la onda viajera de voltaje de duplicarse cuando encuentra un terminal abierto. La posibilidad de este evento y sus posibles consecuencias se deben tener en consideración.

Este flameo o relampagueo se puede prevenir instalando pararrayos contra pulsos, del tipo de línea, directamente en el punto abierto del circuito o aumentando el aislamiento (doble del valor normal de la línea de llegada) del terminal de la línea en los confines de la estación, en el punto del circuito abierto

NOTA.- Este voltaje de elevación (withstand) incrementado, también se aplica a los equipos de conexión (switcheo) y apertura de circuitos.

2.4.5 CONTROL DEL GRADIENTE DE POTENCIAL DE LA SUPERFICIE

La tendencia de que aparezcan gradientes de potencial empinados, alrededor de los electrodos discretos, produce superficies de tierra con potencial no uniforme, en el área de la subestación, durante los eventos de falla.

Esto puede ser peligroso para las personas que trabajan allí; por eso se diseña con límites bajos para las estructuras. La alternativa es utilizar red o malla enrejillada formada con conductores desnudos y pequeños, debajo del suelo, y conectados a la estructura de la estación.

Esto no reduce, apreciablemente, la resistencia a tierra de toda la estación, pero la uniformiza, funciona como la cinta conductora en el aislamiento de los cables. Sólo aparecen pequeños voltajes entre los conductores cruzados de la malla o red. El potencial peligroso de choque eléctrico, para los trabajadores, se reduce considerablemente. Además, se recubre con grava para reducir la conductancia de contacto entre el terreno y los pies del trabajador.

2.4.6 GRADIENTES DE POTENCIAL EXTERNOS, PERO ADYACENTES A LA CERCA DE LA ESTACION

La pendiente de la superficie de voltajes adyacentes, pero afuera de la cerca, determina el nivel de choque eléctrico que recibiría alguna persona que se acerque a tocarla.

Si la cerca estuviera flotando, el gradiente de potencial se podría reducir. La práctica común es que la cerca se conecta a la malla de tierra de la estación, poniéndola a potencial de la rejilla y creando gradientes de potencial elevados en las cercanías de la cerca.

El argumento para esta conexión es que se evita el peligro de que caiga una línea de alta tensión sobre la cerca y dañe a las personas. En este caso, la cerca se conecta a la red de tierra y el voltaje de la cerca, en el caso de falla, se mantiene bajo y con poca resistencia a tierra para que circule la corriente suficiente para que actúe el sistema de protección de fallas a tierra.

Por otro lado, al conectar la cerca a la red de tierra, se mejora la uniformidad de los gradientes en la superficie, pero, adentro de la estación.

Una alternativa sería colocar la cerca a lo largo de una línea de voltaje específico o definido desde el diseño; es decir, que la cerca siga una línea de voltaje constante. Esto puede reducir hasta un 50% los potenciales externos a la cerca.

Para prevenir la ruptura de una línea sobre la cerca, se puede colocar un cable de guarda sobre ella. Las tendencias actuales son: conectar la cerca a la malla de tierra y extender la malla en los contornos exteriores.

Se debe evitar la extensión de las estructuras de la estación fuera de los bordes de la cerca, por ejemplo: tuberías de agua, de aire, cables mensajeros, etc., que no tienen función eléctrica. Lo que estas extensiones hacen es llevar el potencial de la malla de tierra de la estación hasta la punta de la extensión metálica.

El potencial de la superficie de la TIERRA cae rápidamente cuando nos alejamos de la cerca. Dependiendo del tamaño de la estación, el contorno del 50% de voltaje estará más cerca en estaciones pequeñas que en las grandes. Para una estación muy grande, esta distancia es de unos 50 pies (15.2 m). Esto quiere decir que una persona parada a 50 pies (15.2 m) de la estructura y tocando un ducto de agua que salga de la estación se expondría al 50% del voltaje de la red de tierra de la estación. Esto es unos 5,000 voltios en una estación de 4.16-33 kV

2.5 SUBESTACIONES EXTERIORES UNITARIAS

Aunque los objetivos funcionales sean los mismos, la concentración de los aparatos en un paquete metálico cerrado y sencillo simplifica la planificación de los equipos del sistema de puesta a tierra, aunque la presencia de la estructura separada del terminal de línea dé un poco de complejidad.

El conductor de tierra asociado con cada circuito que entre o salga de la subestación debe pasar por la subestación propia y terminar en la barra de tierra de la misma.

Este conductor debe tener la sección transversal suficiente para la capacidad del circuito involucrado y tan cerca de los conductores de potencia, como sea posible.

Los problemas para reducir el peligro de los choques eléctricos a las personas, en las cercanías, son de la misma naturaleza que en las subestaciones abiertas.

En las cercanías de muchas plantas industriales, la corriente de falla se reduce a niveles de 400 amperios y así se reducen los gradientes de potencial alrededor de la subestación, de tal forma que no se necesita cerca o valla. Las personas se pueden acercar sin peligro.

La barra de tierra y la estructura de la subestación se deben conectar al sistema de tierra del edificio, sin importar si la subestación tiene electrodo local de aterrizaje.

En el caso de que la estructura de la subestación se exponga a rayos o que tenga pararrayos, se le debe poner su electrodo de aterrizaje. Se pueden usar las varillas de refuerzo de la base de la subestación.

2.6 INSTALACIONES EXTERIORES QUE SIRVEN MAQUINARIA ELECTRICA PORTATIL PESADA

Este es el caso de grúas, palas mecánicas, rastras, dragas e instalaciones en minas. Los niveles de voltaje pueden llegar hasta 7,500 voltios. Por su movilidad y porque los centros de conexión también son portátiles, se dificulta la posibilidad de colocar redes de tierra, como en las instalaciones permanentes.

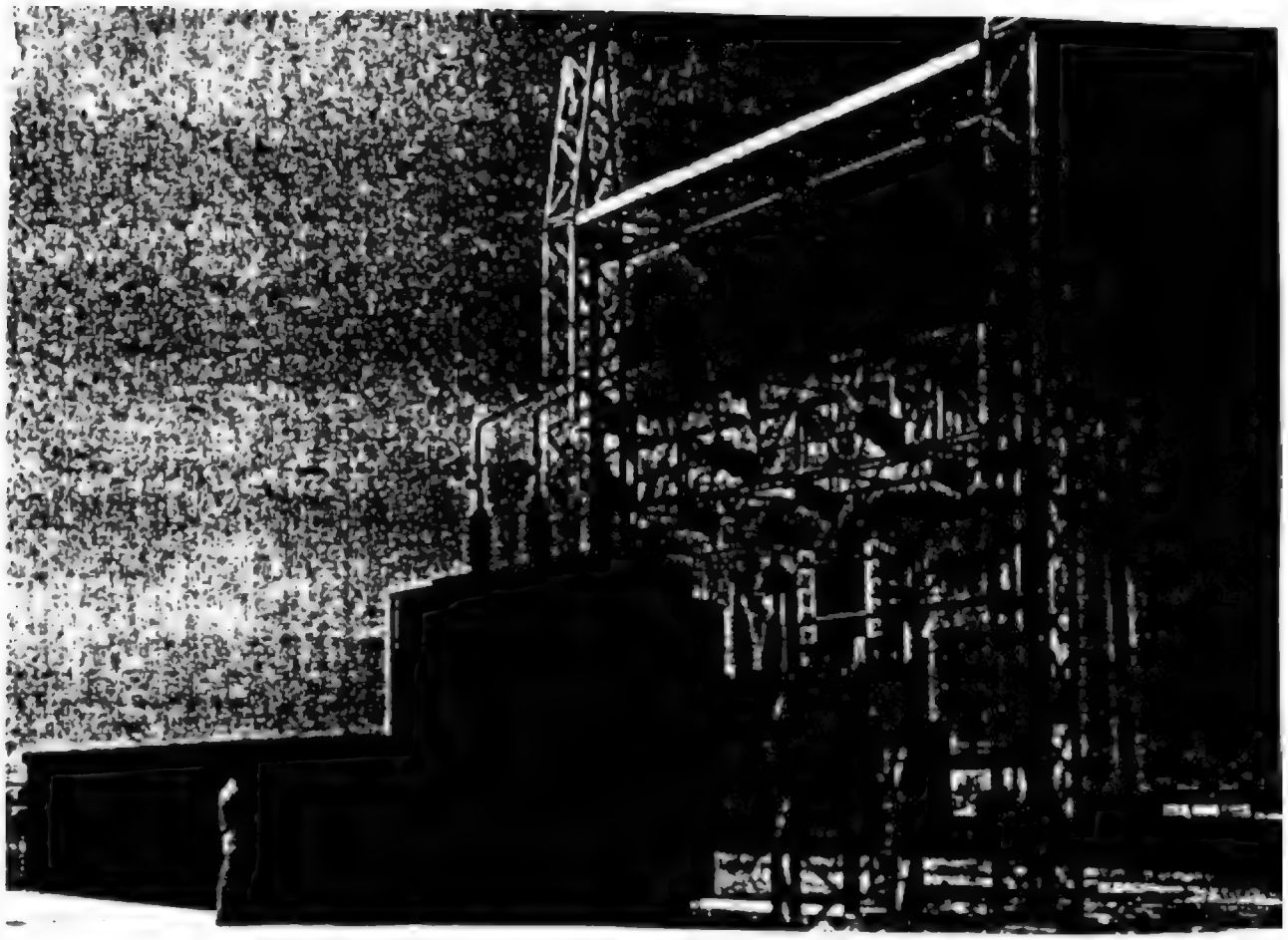


FIGURA 39 Subestación unitaria exterior

Estos equipos portátiles se deben diseñar para que el personal los pueda tocar sin peligro de choques eléctricos.

La corriente de falla a tierra es pequeña, 50 ó 25 amperios. Se usa disparo sensible de operación rápida contra falla a tierra.

Se lleva un conductor metálico, de sección suficiente, desde la fuente de alimentación hasta cada parte del equipo portátil y hasta cada estructura o carcaza del equipo. No se instala interruptor en el conductor de aterrizaje. Se debe garantizar que los conductores de potencia se desconecten antes de separar el conductor de aterrizaje.

Podemos poner un sistema de monitoreo continuo sobre la continuidad del conductor de tierra. Si detecta alguna discontinuidad, deberá desconectar inmediatamente los cables de potencia.

En la fuente de este equipo portátil, el electrodo de tierra debe estar a más de 50 pies (16.4 m) fuera de la subestación, para evitar que se transmita algún potencial de la red de tierra de la subestación. (Figs. 40 y 41)

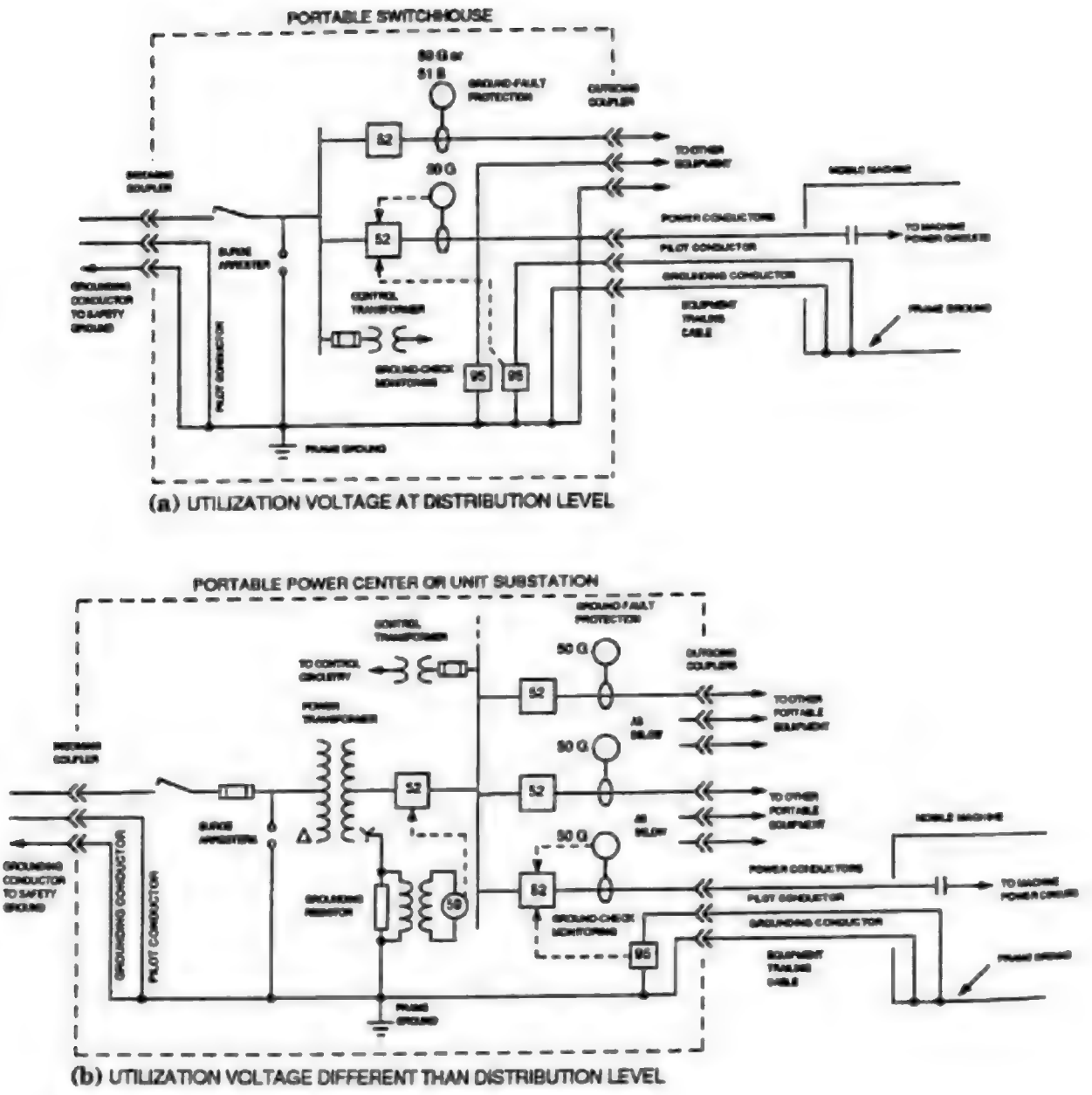


FIGURA 40 Aterrizaje del bastidor de maquinaria portátil o móvil de corriente alterna como parte del sistema de aterrizaje de seguridad

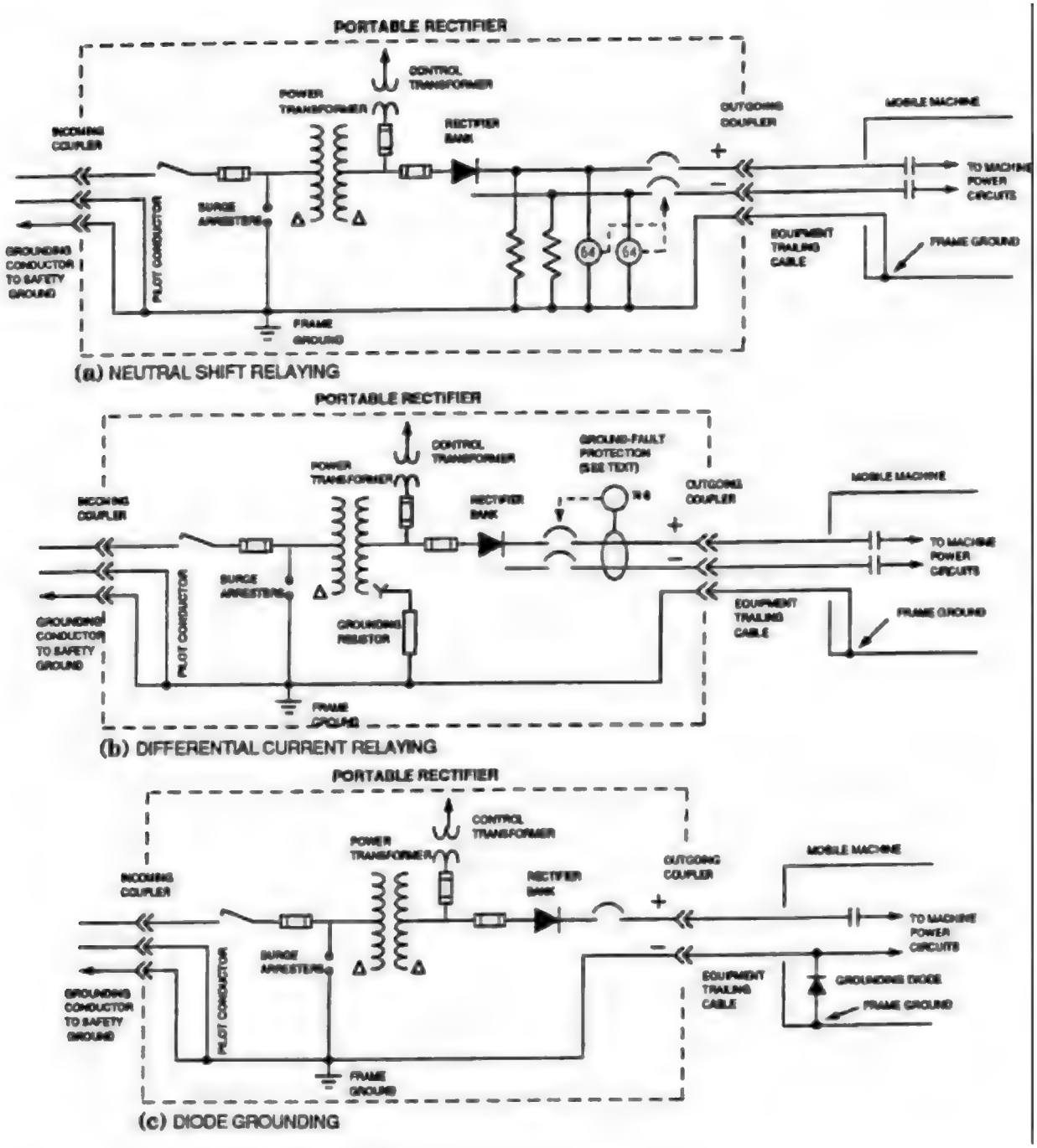


FIGURA 41 Aterrizaje del bastidor de maquinaria portátil o móvil de corriente directa como parte del sistema de aterrizaje de seguridad

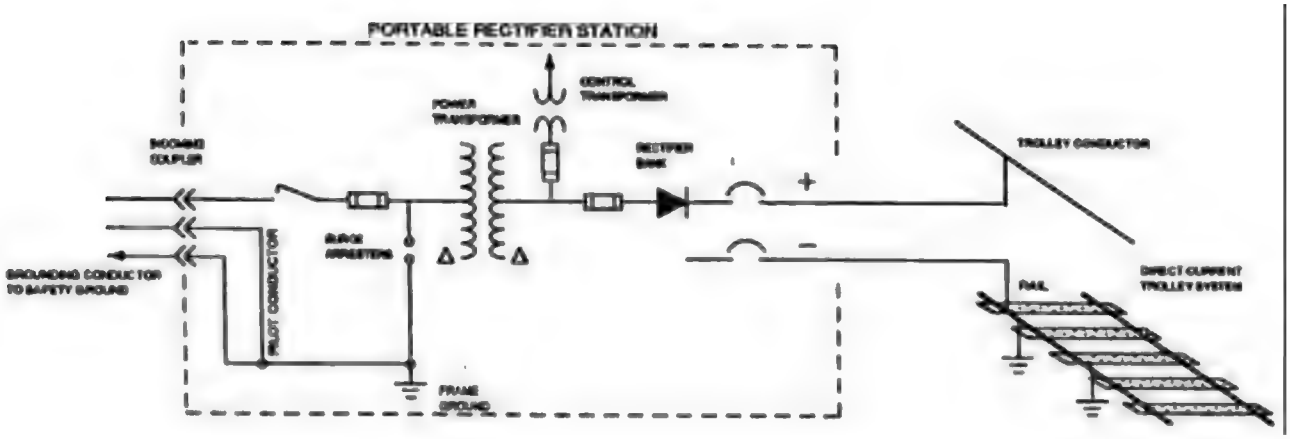


FIGURA 42 Conexiones de aterrizaje de un sistema de "trolley" de corriente directa alimentado por un sistema de tierra de seguridad

2.7 SISTEMAS DE ALAMBRADO INTERIOR

2.7.1 GENERALIDADES

El primer código con normas para sistemas de potencia eléctrica en residencias, fábricas y edificios comerciales apareció por 1893. Este código se revisa cada 3 años, atendiendo las sugerencias o críticas que envía el personal técnico y práctico. El artículo del ANSI/NFPA 70-1981 se refiere a las tomas de tierra.

Todos los equipos de los sistemas de toma de tierra deben cumplir con estos requisitos y conforme a las condiciones del NEC. Este código define los mínimos aceptables, el diseñador los puede sobrepasar, según su propio criterio.

2.7.2 EQUIPO DE SERVICIO A EDIFICIOS

El término "equipo de servicio" se le aplica a los aparatos de "switcheo" y protección, instalados donde el sistema eléctrico entra al edificio. La filosofía es que los equipos y técnicas de construcción aseguren que el equipo no será el causante de incendio o explosión peligrosa, exposición a choque por voltaje o condiciones ambientales eléctricas desfavorables dentro del edificio.

Los conductores eléctricos de potencia y la entrada de servicio no gozan de la protección que tienen los circuitos hacia los equipos del edificio, por lo tanto, cualquier falla eléctrica en ellos puede provocar fallas severas con arqueo, que pueden persistir y provocar algún incendio.

El Art. 230 del NEC describe algunos requisitos para reducir estos peligros. La longitud de los conductores de entrada no debe ser mayor que lo necesario.

Después que traspasan las paredes exteriores del edificio, deberían llegar inmediatamente a los equipos. No deben viajar por espacios encerrados en las paredes. Tienen normas rígidas de construcción para que el aislamiento falle menos.

Se definen calibres mínimos, pensando en las expansiones y en el tipo de actividad. Los requisitos son más estrictos para los conductores de puesta a tierra.

Los esfuerzos de voltaje sobre el sistema eléctrico de potencia se controlan mejor cuando uno de los conductores se aterriza sólidamente, sin impedancia intencional.

Para tener las ventajas de los sistemas monofásicos con un punto a tierra, se debe tener, también, un conductor del sistema de potencia aterrizado sólidamente. El NEC recomienda aterrizar los sistemas de corriente alterna de 50 a 1,000 voltios, en las siguientes condiciones:

(1) Cuando el sistema puede caer a tierra, de tal forma que el máximo voltaje a tierra de los conductores, sin falla, no exceda los 150 voltios

(2) Cuando el sistema es de 480Y/277 voltios, trifásico, cuatro hilos y se usa el neutro como conductor

(3) Cuando el sistema es de 240/120 voltios, trifásico, cuatro hilos y se usa como conductor el punto medio de una de las fases

(4) Cuando un conductor de la entrada de servicio no está aislado. Así reglamenta el Art. 230-40 del NEC.

Hay cuatro excepciones a estas reglas: para sistemas que sirven hornos, para sistemas aislados y para sistemas derivados separadamente. Para mayores detalles puede consultar el Art. 250-5 del NEC.

Esas reglas ordenan operación aterrizada de los sistemas: 240/120 V monofásico tres hilos, 208Y/120 V conectado en estrella trifásica de cuatro hilos, 480Y/277 V conectado en estrella trifásica de cuatro hilos y 240/120 V trifásico de cuatro hilos.

Para garantizar la seguridad contra esfuerzos excesivos de voltaje en el alambrado interior de los edificios, se aplican las siguientes reglas en la fuente de suministro de potencia:

(1) Cualquier sistema eléctrico de potencia de corriente alterna, en el secundario, que opere con un conductor aterrizado, deberá llevar este conductor al punto de aterrizaje de cada uno de los servicios que se alimentan, usando un conductor con un tamaño no menor que el que establece el Art. 250-94 del NEC. Tabla 250-94, página 70-104 (58 de este folleto)

(2) En el caso de varios sistemas de potencia aterrizados que alimentan a un edificio, los conductores de los circuitos de tierra de todos los circuitos que entran al edificio se deben unir en el equipo de servicio, en las carcazas, en el conductor aterrizado de la entrada de servicio y a un electrodo aterrizado efectivamente.

(3) Las reglas del NEC son claras en cuanto a que todos los sistemas interiores con ductos metálicos se deben unir al sistema de aterrizaje del equipo, cerca del equipo de servicio.

(4) Todos los circuitos monofásicos de carga aterrizados en un lado se deben conectar (en el lado aterrizado), a un conductor de tierra aislado que procede desde el equipo de servicio. Este conductor debe permanecer aislado siempre (con algunas excepciones) y se debe identificar con el color BLANCO o GRIS. El propósito de esto es evitar que la caída IZ, que provoca la corriente de retorno en el conductor aterrizado, se pase a la estructura metálica del edificio.

La intención de todas estas reglas es alcanzar, lo más que se pueda, la condición de diferencia de potencial cero entre los conductores eléctricos de tierra, las carcazas de los equipos, las ducterías metálicas que llevan los conductores y las diferentes partes metálicas expuestas de las estructuras del edificio y ductos metálicos.

Para cualquier persona, la protección contra choque eléctrico por voltaje no debe cambiar, aunque el conductor aterrizado de la entrada de servicio tenga algún potencial diferente del potencial de TIERRA.

Si apareciera voltaje entre las partes que hemos descrito, se provocará una corriente no planeada ni deseada, a través de esos miembros o elementos conductores, lo que generalmente provoca fallas en el aislamiento de los conductores de potencia con energía.

2.7.3 CIRCUITOS ELECTRICOS INTERIORES

En cada circuito eléctrico de potencia que entra desde la fuente de servicio hacia el edificio, alimentando la potencia eléctrica a los equipos o aparatos que se deben aterrizar, debe llevar un conductor de puesta a tierra del equipo, dimensionado de acuerdo al Art. 250-95, con los conductores de potencia.

En muchos casos puede servir el ducto metálico o canaleta (NEC Art. 250-91b). Los aparatos o equipos tienen esa terminal para realizar la conexión a tierra. Como este conductor no lleva corriente sostenida, siempre se logra el concepto de diferencia de potencial cero, a menos que se produzca una falla cuya corriente circule por ese conductor.

2.7.4 "WITHSTAND" TERMICO:

2.7.4.1 GENERALIDADES: cuando se usa conduit metálico como conductor de aterrizaje de equipo, no se necesitan consideraciones especiales de la capacidad de falla del conduit.

Cuando se usa conductor de cobre para complementar al conduit metálico o cuando se necesita un conductor, como en el caso de ductos no metálicos, el diseño se debe evaluar para asegurar que el valor nominal térmico del conductor no se excede.

Si se excede el valor nominal térmico del conductor podemos tener dos efectos:

(1) El incremento de temperatura puede dañar el aislamiento ya sea del conductor de aterrizaje del equipo o de los conductores de fase adyacentes, especialmente cuando el conductor de aterrizaje es desnudo, inutilizándolos para limpiar la falla que vendrá enseguida
(2) La temperatura excesiva puede fundir el conductor de aterrizaje del equipo, limpiando el paso de corriente de falla, pero convirtiendo el equipo fallado en inseguro por los voltajes elevados
(3) La resistencia térmica se expresa en términos de I^2t, en donde I es el valor RMS de la corriente de falla y t es el tiempo de limpieza de la falla.

2.7.4.2 DAÑO AL AISLAMIENTO: el daño al aislamiento termoplástico, polietileno y hule de etil propileno se define con la ecuación:

$$I^2t / A = 0.0297 \log [(T_m + 234) / (T_i + 234)]$$

En donde:

I = corriente de falla a través del conductor, amperios
A = área de la sección transversal de conductor, circular mils
T = tiempo de falla, segundos
T_i = temperatura inicial de operación, grados Celsius
T_m = temperatura máxima sin daño, grados Celsius

La temperatura inicial, T_i, se toma como la temperatura nominal máxima de operación del conductor, en vez de la temperatura real de operación. Esto es una aproximación conservadora, pero puede producir sobredimensionamiento del conductor de tamaño comercial

La temperatura máxima, T_m, es 150º C para aislamiento termoplástico, y 250º C para aislamientos de polietileno y hule de etil propileno.

Si el conductor de aterrizaje del equipo está subdimensionado para la corriente de falla y tiempo de limpieza, puede ocurrir el daño al aislamiento de los conductores de fase en el conduit debido a la proximidad del conductor de aterrizaje del equipo al conductor de fase.

Si el criterio es fusión, se puede usar una temperatura final para el cobre de 800º C

Si se pone el conductor que señala la tabla 250-94, no habrá esfuerzos térmicos sobre el conductor de tierra, siempre que el diseño del sistema sea correcto. Si hay alguna condición especial, se deberá incrementar el calibre del conductor de tierra, como cuando lo exija el esquema de protección.

2.7.4.3 DISPOSITIVOS DE INTERRUPCION AUTOMATICA: todos los dispositivos de interrupción automática, sea fusibles o circuit breakers, necesitan un tiempo definido para cumplir con la interrupción de corriente. Muchos dispositivos son de tiempo inverso en que el tiempo de limpieza es menor si la corriente es alta. Cada uno de los dispositivos, sin embargo, tiene un límite superior de velocidad máxima de limpieza determinado por consideraciones físicas de masa y energía.

Los interruptores de polo sencillo se usan ampliamente para proteger circuitos polifásicos. Una falla a tierra en una fase podría producir un I^2t sobre el conductor de aterrizaje del equipo que exceda su valor nominal térmico, aún si el interruptor de fase interrumpe la corriente de la fase fallada con un I^2t de disparo no mayor que el valor nominal del conductor de aterrizaje del equipo.

La limpieza de la fase fallada no para necesariamente la corriente de falla a tierra

La corriente puede fluir por las fases no falladas, a través de la carga y retornar al conductor de la fase fallada.

Como la corriente de falla a tierra se reduce por la longitud del paso de la corriente de falla a través de la carga, el tiempo para que opere el interruptor sencillo de fase se puede incrementar.

Aunque la corriente de falla a tierra se podría reducir, el incremento de tiempo podría causar daño térmico.

Los circuit breakers trifásicos a menudo tienen característica tiempo-corriente ajustable.

En su forma más sencilla, el sensor el disparo magnético o de estado sólido que siente la corriente de fase para operación instantánea se puede ajustar desde el 300-500% del valor nominal de sobrecorriente en la parte baja, hasta 800-1,000% del valor nominal de sobrecorriente en la parte alta.

Si el circuito de falla a tierra se diseña para un mínimo del 500% del valor nominal de sobrecorriente, un disparo alto produciría un tiempo largo de respuesta.

Hay tendencia a ajustar el disparo instantáneo, magnético o de estado sólido, lo más alto posible, para evitar disparos molestos provocados por corrientes de entrada iniciales altas.

Muchos dispositivos de disparo sofisticados de circuit breakers pueden tener retardos de tiempo ajustables que permiten ajustar la curva tiempo-corriente para coordinar con dispositivos aguas arriba y aguas abajo.

Hay una tendencia a ajustar el retardo de tiempo lo más largo posible para lograr coordinación con tantos dispositivos de protección de sobrecorriente aguas abajo, como sea posible.

El ajuste de disparos por corriente altas a valores excesivamente grandes o el incremento de retardos de tiempo a valores altos podría provocar daño térmico en el conductor de aterrizaje del equipo.

2.7.4.4 DIMENSIONAMIENTO DEL CONDUCTOR DE ATERRIZAJE DEL EQUIPO: la selección del conductor de aterrizaje del equipo dimensionado de acuerdo con el NEC, TABLA 250-95, no necesariamente da un sistema seguro o libre de potenciales daños al aislamiento.

Cuando se usa un conductor separado de aterrizaje del equipo para reforzar el sistema de aterrizaje del conduit metálico, es difícil determinar la división de corriente de falla entre el conductor y el conduit.

Es posible que las anteriores fallas a tierra en el sistema de conduit metálico no provocaran daño térmico porque no fluyó por el conductor la máxima corriente de falla a tierra

Estas consideraciones no sirven para conductores de aterrizaje de equipo en conduit no metálicos. En este caso, toda la corriente de falla a tierra fluirá por el conductor de aterrizaje del equipo y se debe considerar el daño térmico

Por ejemplo, consideremos un alimentador de 400 A con un conductor de aterrizaje del equipo No. 3 AWG dimensionado con la TABLA 290-95

Usando una temperatura inicial de 60º C y una temperatura final de 250º C para aislamiento de polietileno.

$$I^2t = 17.8\ (10^6)$$

Si la corriente de falla a tierra se diseña que sea un mínimo de 500% de la corriente nominal, el dispositivo de protección debe limpiar la falla en el orden de 4.5 segundos para limitar la temperatura final a menos de 250º C

El diseño de la corriente de falla a un mínimo de 800% de la corriente nominal reducirá el tiempo de limpieza necesario, del dispositivo de protección, a 1.7 segundos.

Al 500% de la corriente nominal, muchos dispositivos de protección de sobrecorriente, tanto fusibles como circuit breakers no limpian para 5 a 15 segundos.

Entonces, es importante que el dispositivo de sobrecorriente específico sea parte del diseño del circuito del conductor de aterrizaje del equipo.

El diseño de corriente de falla a tierra a un mínimo del 800% de la corriente nominal o el incremento del tamaño del conductor de aterrizaje del equipo permitirá que los dispositivos estándar de sobrecorriente protejan adecuadamente del daño térmico a los conductores de aterrizaje del equipo.

Como alternativa se puede usar dispositivos de sobrecorriente de actuación rápida o equipo sensor de corrientes de falla.

2.7.4.5 SENSORES DE CORRIENTE DE FALLA: el uso de dispositivos de sobrecorriente de fase para detectar y limpiar una corriente de falla no es lo ideal.

El dispositivo de sobrecorriente de fase se puede diseñar para soportar sobrecargas por un tiempo considerablemente largo y que sea capaz de limpiar corrientes de falla muy altas.

Típicamente, las fallas a tierra son de nivel bajo y pueden ser menores que el valor nominal del dispositivo de sobrecorriente de fase. Además, como las fallas a tierra, generalmente, involucran un arco, cualquier retardo en la limpieza de la falla a tierra producirá daño al material.

Una falla a tierra se puede detectar con alguna de las tres formas siguientes:

(1) retorno de tierra
(2) secuencia cero
(3) corriente diferencial

Los tres métodos se muestran en la Fig. 43.

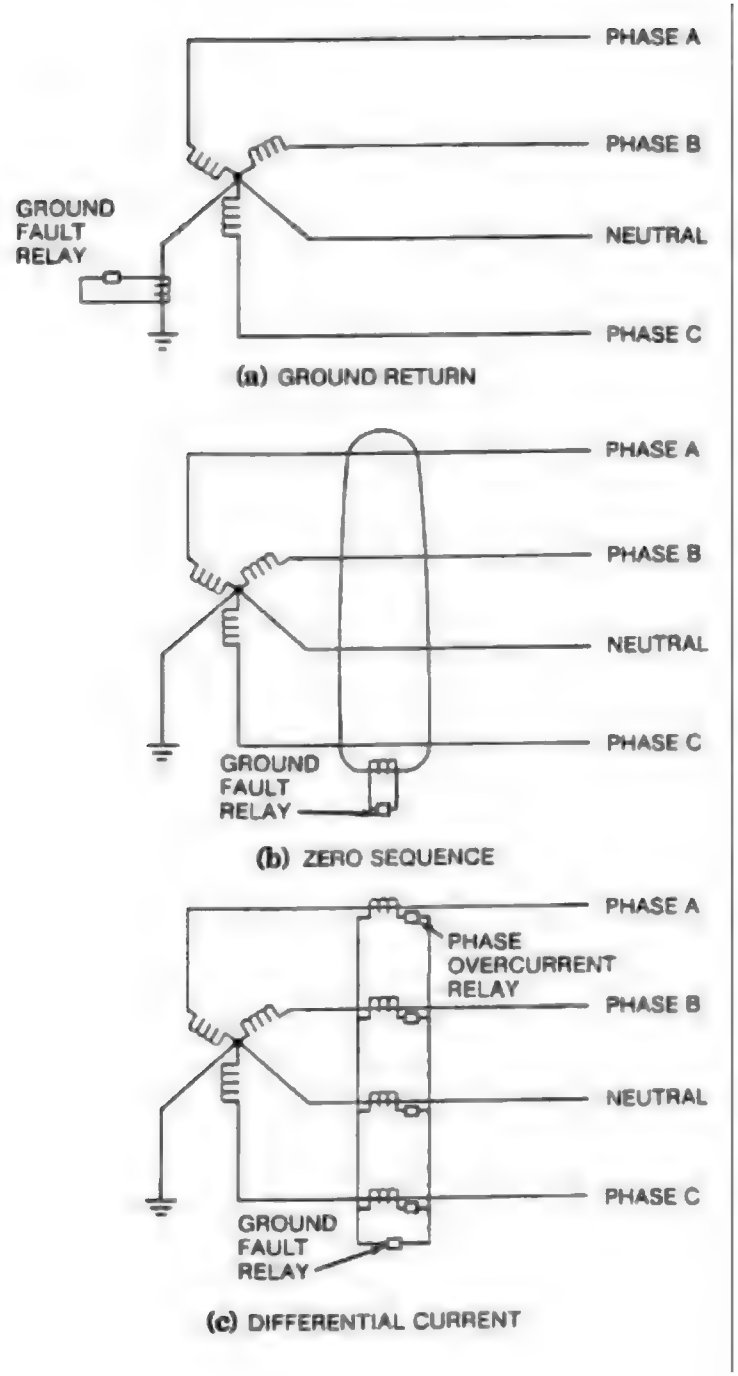


FIGURA 43 Sensores de corriente de falla

El sensor de retorno de tierra sólo se aplica en el transformador fuente o en el generador. (Vea en la sección 1.6.3 las limitaciones debidas a fuentes múltiples). En la conexión desde el transformador a tierra se controla el flujo de corriente. Ya que la corriente normal de carga no debería retornar a la fuente por tierra a este conductor, cualquier corriente detectada será una corriente de falla a tierra.

Cuando no está disponible el conductor de aterrizaje de la fuente, como en el sitio de algún alimentador, se puede colocar un transformador de corriente sencillo, alrededor de los conductores de fase y del neutro, si existe, para detectar las corrientes de secuencia cero o de tierra.

Si no existe corriente de falla a tierra, el campo magnético de cada uno de los conductores de carga se cancelará y no habrá salida desde el transformador de corriente.

Si existe una corriente de falla a tierra, hay una corriente neta de secuencia cero en los conductores de carga y transformador de corriente detectará el campo magnético resultante.

Cuando se necesitan transformadores de corriente para protección de sobrecorriente de fase, la detección de la corriente de falla a tierra se puede lograr sumando las corrientes de fase.

Si existe una corriente de falla a tierra, la suma neta de las corrientes de fase y del neutro, si existe, no será cero.

La conexión que se muestra en la Fig. 43 (c) provee una suma vectorial de la corriente de carga. Si la suma no es cero, la corriente diferencial fluirá en el relé de falla a tierra.

El relé de falla a tierra puede ser extremadamente sensible a fallas a tierra de nivel bajo y puede operar con retardo mínimo. Su salida se usa para abrir un dispositivo de interrupción y limpiar la falla a tierra.

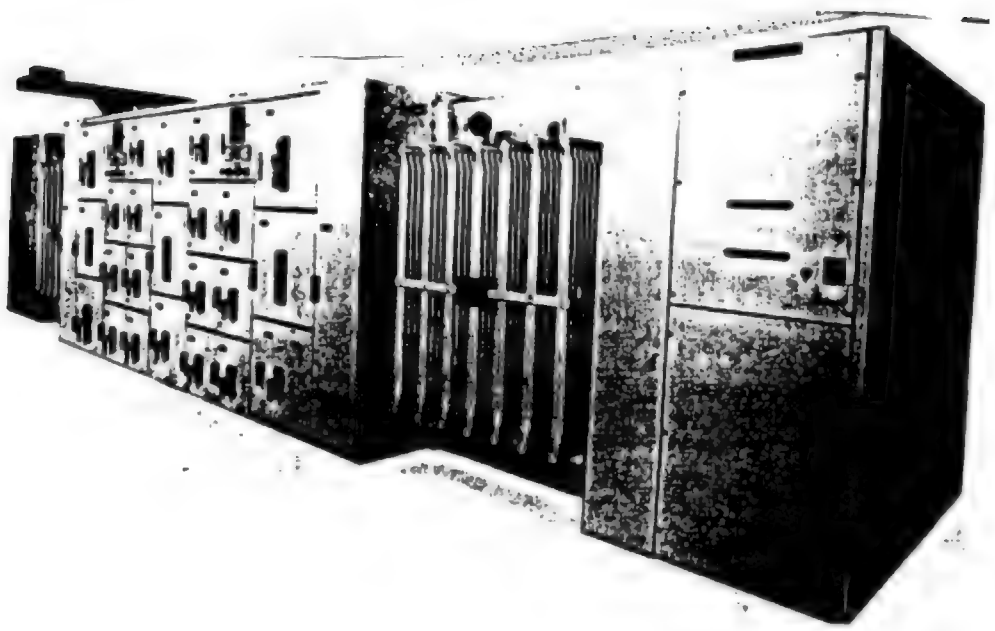


FIGURA 44 Subestación unitaria interior - Montaje unitario típico

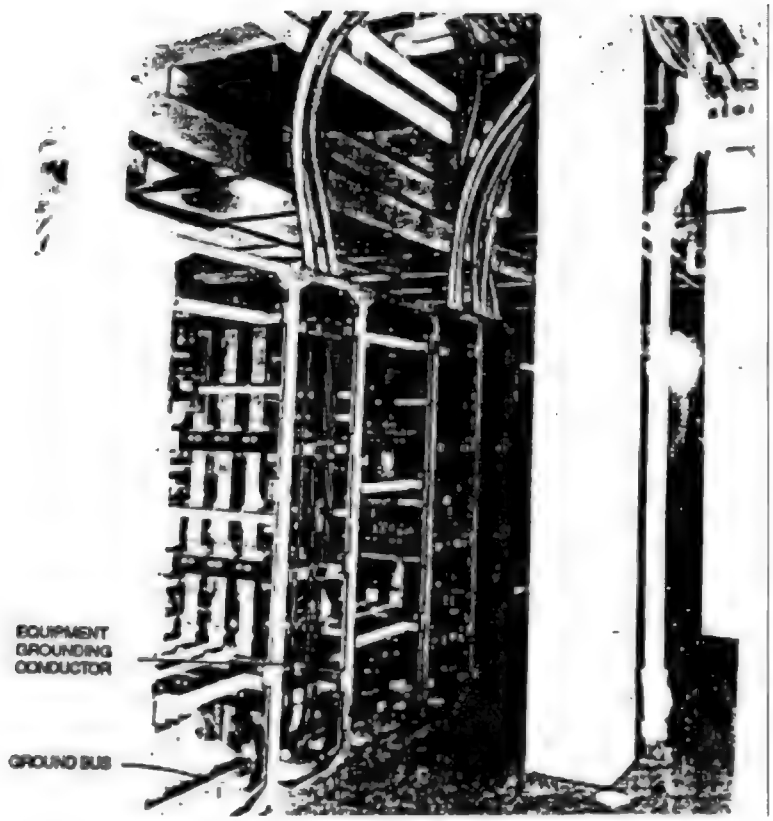


FIGURA 45 Subestación unitaria interior - Vista posterior que muestra el uso de un conductor de aterrizaje independiente para cada uno de los circuitos

2.8 SUBESTACIONES UNITARIAS INTERIORES Y CENTROS DE "SWITCHEO"

2.8.1 CENTROS DE "SWITCHEO" (Figs. 44 y 45)

Los más comunes son equipos encerrados en estructuras metálicas que se ensamblan en la fábrica y que se arreglan y disponen, de acuerdo a las normas de la industria.

Se reconoce la necesidad de conductores de aterrizaje y se suministran los puntos de toma de tierra. Se puede inspeccionar rápidamente para verificar que se cumpla la máxima de que la corriente de falla a tierra busca la trayectoria más cercana, físicamente, a los conductores de fase que llevan esta corriente hacia el exterior.

Los problemas de instalación en el campo se reducen si se asegura la integridad de los conductores de aterrizaje, especialmente en los puntos terminales de cada equipo. El conductor de aterrizaje debe cumplir con las necesidades de la sección transversal de cada circuito.

Los terminales deben cumplir con los requisitos de una junta eléctrica para soportar, con seguridad, la corriente elevada en un tiempo tan corto. Lo mismo diríamos del terminal en el centro de switcheo.

A veces se descuida el terminal de los ductos, cuando éstos se usan como conductor de aterrizaje. Debemos prevenir los siguientes defectos:

(1) Las canaletas y ductos de los cables no se reconocen como conductores eléctricos, por lo tanto no tienen terminal para aterrizarlos

(2) El conductor desde la canaleta sólo sirve como drenaje de carga estática y se une al terminal de tierra con conductor calibre # 12 AWG

Las canaletas que sirven como conductores de aterrizaje se deben asegurar con doble tuerca y con un cable adicional, si el servicio es pesado. Es decir, que, a medida que aumenta la capacidad del sistema se deberá incrementar la solidez de la conexión, para evitar que se queme la conexión y que se queden sin protección, los equipos y las personas.

2.8.2 SUBESTACIONES UNITARIAS DE TRANSFORMACION

Dan algunos problemas adicionales. El sistema eléctrico que deriva del secundario del transformador es un nuevo sistema eléctrico, con sus propios problemas de sus equipos y de su sistema de puesta a tierra.

El tratamiento de todos los circuitos primarios que entran en la estructura debe ser con los mismos criterios de diseño que se usan para estructuras sencillas de switcheo. Se necesita un conductor de aterrizaje, desde la fuente hasta el interior de la estructura, para el caso de una falla en cualquier punto, a lo largo del circuito primario o en el interruptor del primario del transformador.

El secundario del transformador es el punto de origen de un nuevo circuito o sistema eléctrico. Es a este punto al que retornan todas las corrientes de falla de cualquier circuito que sale de este secundario. Todos los conductores de aterrizaje de los circuitos secundarios deben llegar al mismo punto común del secundario del transformador.

Para la operación del sistema aterrizado, este punto común se une al conductor aterrizado del circuito (en el lado de la fuente del dispositivo de sobrecorriente o del medio de desconexión), a la estructura del transformador u otras partes metálicas y a cualquier parte metálica adyacente a la estructura del edificio o sistema de tuberías.

Si hay peligro de descargas eléctricas, se debe asegurar un electrodo de aterrizaje que se conecta a la unión central de los conductores de aterrizaje del secundario.

En muchos casos se observa que los sistemas primario y secundario se interconectan; esto sucede por mera coincidencia, ya que los conductores con energía, del primario y del secundario, están en la misma estructura metálica.

Funcionalmente, los dos conductores de aterrizaje son diferentes. Por ejemplo, si tenemos un motor que impulsa un generador a través de una faja conductora, los conductores de aterrizaje del motor y del generador son independientes entre sí.

2.9 APARATOS TERMINALES

La función de aterrizar los equipos, en los aparatos terminales, es sólo para conectar las partes metálicas, no eléctricas, de las cajas en que se encuentran los aparatos terminales o que se encuentran adyacentes a cables con energía, con el conductor de aterrizaje.

Los tamaños y terminales deben cumplir las mismas reglas, dependiendo de los valores nominales y características del equipo de protección de sobrecorriente más cercano.

Cuando la canaleta sirve como conductor de aterrizaje, sólo se necesita una conexión eléctrica buena.

Si conectamos a la estructura del edificio, cuando los equipos son estáticos o fijos, sólo estamos dando seguridad, aunque podría ser redundante. Funcionalmente, es mejor el conductor de aterrizaje, a menos que se rompa o se interrumpa.

La Fig. 46 ilustra las conexiones de los conductores de aterrizaje y establece claramente la diferencia entre los conductores de ATERRIZAJE (GROUNDING) y de los conductores ATERRIZADOS (GROUNDED).

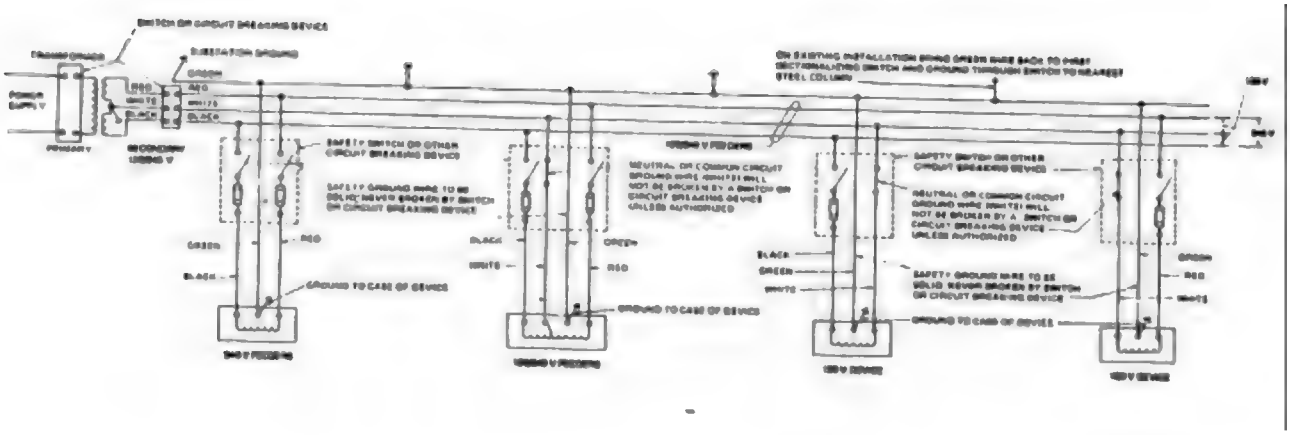
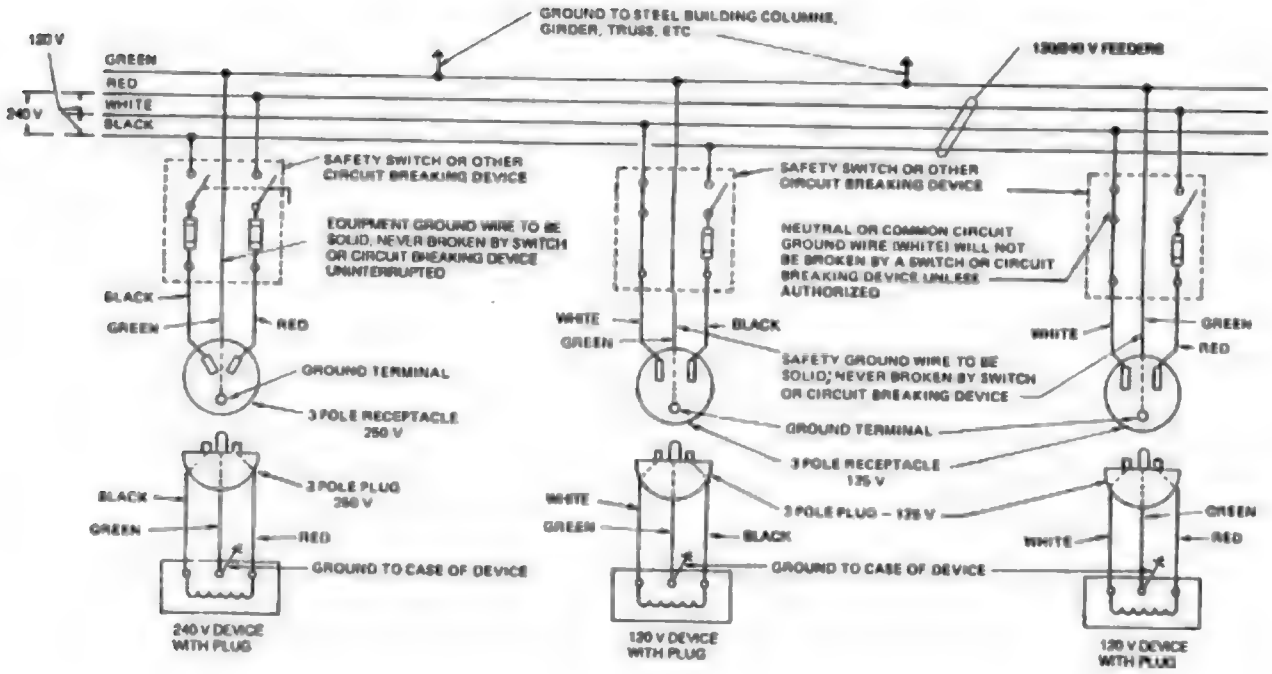


FIGURA 46(a) Equipo fijo


GROUND TO STEEL BUILDING COLUMNS, GIRDER, TRUSS, ETC
120 V
240 V
GREEN
RED
WHITE
BLACK
SAFETY SWITCH OR OTHER CIRCUIT BREAKING DEVICE
EQUIPMENT GROUND WIRE TO BE SOLID, NEVER BROKEN BY SWITCH OR CIRCUIT BREAKING DEVICE UNINTERRUPTED
GROUND TERMINAL
3 POLE RECEPTACLE 250 V
3 POLE PLUG 250 V
GROUND TO CASE OF DEVICE
240 V DEVICE WITH PLUG
NEUTRAL OR COMMON CIRCUIT GROUND WIRE (WHITE) WILL NOT BE BROKEN BY A SWITCH OR CIRCUIT BREAKING DEVICE UNLESS AUTHORIZED
SAFETY GROUND WIRE TO BE SOLID; NEVER BROKEN BY SWITCH OR CIRCUIT BREAKING DEVICE
3 POLE RECEPTACLE 125 V
3 POLE PLUG – 125 V
120 V DEVICE WITH PLUG

NOTAS.- (1) Viendo el frente del interruptor, dispositivo disyuntor, transformador, etc., el alambre caliente del lado izquierdo debe ser negro, el alambre caliente del lado derecho debe ser rojo
(2) El neutro del circuito ó alambre común del circuito (aterrizado) será blanco
(3) El alambre aterrizado de seguridad será verde. (Este alambre se une a la carcaza del dispositivo

FIGURA 46(b) Equipo portátil

FIGURA 46 Patrones típicos de conductores de la fuente de circuitos de potencia para uso en aparatos con énfasis en la distinción entre conductores de aterrizaje y aterrizados

3.- ATERRIZAJE DE PROTECCION CONTRA CARGA ESTATICA Y DESCARGAS ELECTRICAS

3.1 INTRODUCCION.

En esta parte veremos la electricidad estática, su generación, métodos de comprobación para proteger de sus peligros, aterrizando o con otros métodos y el aterrizaje para protección contra rayos. La protección contra rayos es esencial en los edificios, líneas de transmisión y equipo eléctrico, para prevenir contra las descargas y pulsos.

Veremos una pequeña descripción del fenómeno, la necesidad de proteger las estructuras, los edificios y los equipos; los requisitos de protección y las prácticas de protección y aterrizaje. No se trata de hacer cálculos ni selección de equipos. Los estudios analíticos se pueden hacer con las publicaciones que se mencionan como referencias.

3.2 ATERRIZAJE DE CARGAS ESTATICAS

3.2.1 OBJETIVO DEL ATERRIZAJE DE CARGAS ESTATICAS: La acumulación de carga estática en el equipo o materiales que se están procesando y sobre el personal de operación produce un peligro potencial serio en los lugares que tienen líquidos inflamables o gases o fibras o desperdicios. La descarga de una acumulación de electricidad estática desde un objeto a tierra o hacia otro objeto cargado a diferente potencial, puede iniciar un incendio o una explosión, en presencia de materiales inflamables o de mezclas combustibles de aire y vapores. Podemos provocar daños a la propiedad y hasta pérdida de la vida de personas.

El principal objetivo del control de las cargas estáticas es la protección de la vida humana. El peligro a la vida no es sólo por los incendios o explosiones, sino también, por los choques eléctricos. En segundo lugar, se trata de prevenir las pérdidas en las siguientes categorías:

(1) Inversiones de capital en edificios y equipos contra incendios y explosiones
(2) Costos de operación para almacenar materiales inflamables
(3) Sobrecarga y pérdida de producción por incendios o explosiones
(4) Inversiones de capital en equipo electrónico sensible a cambios de voltaje excesivos o rápidos
(5) Pérdida de datos almacenados electrónicamente, a causa de transitorios de voltaje

Si estas pérdidas se pueden evitar por el control adecuado de las cargas estáticas, la inversión se debe tomar como un gasto en seguros. El control de cargas estáticas también se necesita para mejorar algunas operaciones de fabricación o calidad del producto. Por ejemplo: en operaciones de molido, operaciones de la industria textil, algunos materiales que se manejan en ductos y que se pegan a las paredes y obstruyen, en la industria de impresos se pierde calidad cuando la suciedad se adhiere al papel o la tinta se pega en partes no adecuadas, además del peligro de los gases y materiales inflamables que se usan en esta industria.

Otros ejemplos son: elevadores de granos; operaciones de cubrir, envolver e impregnar; con bandas transportadoras y poleas; limpieza de ropa; combinaciones y mezclas; llenado de tanques de automóviles, camiones, aviones, barcos, etc., con líquidos inflamables. Cada uno de los procesos tiene un tratamiento adecuado, según lo que se quiere hacer con la carga estática: descargarla poco a poco, prevenir su acumulación, etc.

3.2.2 CAUSAS FUNDAMENTALES DE LA ELECTRICIDAD ESTATICA:

3.2.2.1 TEORIA DE LA GENERACION DE CARGA ESTATICA: probablemente es la primera manifestación de la electricidad. Los griegos observaron este fenómeno unos 600 años A.C. Observaron que una pieza de ámbar que se frotara con otro material tenía la habilidad de atraer o repeler otros objetos livianos; pero la investigación científica del fenómeno se realizó hasta unos 23 siglos después.

En un cuerpo neutro o descargado, los electrones (componentes negativos del átomo) y los protones (componentes positivos) están presentes en igual número y sólo se pueden separar gastando energía: mecánica, térmica o química.

Los electrones se pueden mover libremente, de una molécula a otra, en los materiales conductores. Los protones no se pueden mover, a menos que se mueva el átomo. En los sólidos sólo se pueden mover los electrones. Pero en los gases y líquidos se pueden mover ambos: protones y electrones.

La electricidad estática se genera cuando se mueven los electrones, al poner en contacto dos materiales diferentes y luego separarlos. Lo que ocurre es que los electrones de un material atraviesan la barrera de separación y los protones, en igual número, permanecen en el cuerpo. Aparece una fuerza de atracción entre los cuerpos y se establece el equilibrio.

Cuando los cuerpos se separan, los electrones producen cargas eléctricas sobre los objetos separados, que se manifiestan como un incremento en el potencial eléctrico entre las dos superficies.

Si los dos materiales son buenos conductores, los electrones en exceso regresarán rápidamente, antes de separar los cuerpos. Pero si uno o ambos son aislantes y, además, están aislados, presentarán carga porque algunos electrones quedaron atrapados en alguno de ellos cuando se separaron. Entonces decimos que el cuerpo aislado se ha "cargado".

Realmente, la carga estática se debe al exceso o deficiencia de electrones y una superficie que tiene exceso o deficiencia de "un electrón" por cada 100,000 átomos se puede considerar "bien cargada".

El potencial que se desarrolla debido a las cargas eléctricas depende de la cantidad de carga depositada en el cuerpo y de la capacitancia de este cuerpo con respecto a sus alrededores.

La relación se expresa así: $V = Q / C$
V: el potencial en Voltios
Q: carga en Coulombios
C: capacitancia en Faradios

Este potencial puede crecer continuamente en los cuerpos aislados expuestos a generación continua de cargas. A un voltaje determinado, la fuga de cargas será igual a la velocidad con que las cargas se llevan al cuerpo aislado, esto es cuando se alcanza una condición estable.

Si la fuga de cargas no es tan rápida, se puede llegar al potencial de descarga o de destello o de chispazo, antes de alcanzar la estabilización.

El incremento de potencial puede alcanzar varios miles de voltios, pero la carga es relativamente inmóvil, es decir, que la chispa desde una superficie aislada generalmente no producirá ignición. La electricidad estática generalmente se produce por:

(1) Materiales pulverizados que pasan por tolvas o bandas neumáticas
(2) Fajas, cuando son de material no conductor
(3) Gas, vapor o aire que fluye a través de un orificio
(4) Movimiento que involucre cambio en la posición relativa de las superficies de contacto, generalmente entre materiales diferentes, líquidos o sólidos, en donde uno o los dos son pobres conductores de la electricidad
(5) El cuerpo humano en ambientes de humedad baja puede acumular carga estática peligrosa de varios miles de voltios por el contacto de sus zapatos sobre las alfombras o por estar o trabajar cerca de maquinaria que genera electricidad estática

3.2.2.2 CONDICIONES QUE AFECTAN LA PRODUCCION DE CARGAS ESTATICAS: la posibilidad de producir carga estática y el grado en que se produce dependerá, principalmente, de:

(1) Características de los materiales
(2) Velocidad de la separación
(3) Area de contacto
(4) Efecto del movimiento entre sustancias
(5) Condiciones atmosféricas

(1) Características de los materiales: ya hemos visto que uno de los dos debe tener más propiedades aislantes que el otro. Pueden ser sólidos, líquidos o gases. Los sólidos pueden ser hojas, láminas o partículas. El grado de carga electrostática que puede existir entre dos materiales será proporcional a la diferencia entre sus constantes dieléctricas. La carga positiva quedará en el material con mayor constante dieléctrica.

(2) Velocidad de separación: a medida que aumenta, también aumenta la posibilidad de que queden cargas atrapadas, por lo tanto aumenta la diferencia de potencial entre ellos. Por ejemplo: la electrificación de un avión en vuelo provocada por las partículas atmosféricas de agua, nieve seca, cristales de hielo o suciedad, aumenta con el cubo de la velocidad del avión.

(3) Area de contacto: esto afecta directamente, aunque tengan la misma densidad de carga. Los cuerpos más grandes acumulan mayor cantidad de carga.

(4) Efecto del movimiento entre sustancias: la electricidad estática se llama también "electricidad de fricción", realmente, la fricción tiene un papel pequeño en el proceso de electrificación. Lo que sí es cierto es que la electrificación aumenta en superficies rugosas, esto es porque las rugosidades aumentan los picos sobre las superficies en contacto. Aunque las superficies sean planas al ojo humano, microscópicamente tienen picos y valles, los electrones viajan por donde hay contacto real.

Asimismo, el calentamiento debido a la fricción facilita la transferencia de electrones. De la misma forma, los líquidos pulverizados o expelidos desde boquillas, especialmente si chocan contra una superficie, producen cargas potenciales altas.

Los líquidos en los tanques acumulan cargas estáticas por la agitación del líquido, por el movimiento del tanque o cuando se llena el tanque.

Otro ejemplo de movimiento es el de una faja sobre una polea, a mayor velocidad, habrá más carga en la faja. El mismo principio se aplica en las hojas que pasan por rodillos, por ejemplo, en la industria de fabricación de materiales de hule, papeles o textiles. Las ruedas de hule desplazándose sobre las carreteras tienen el mismo efecto y acumulan cargas estáticas en los automóviles, camiones tanqueros, etc.

(5) Condiciones atmosféricas: las condiciones de humedad son las que más se conocen. Ya conocemos la experiencia de la carga que se gana en días secos, cuando caminamos sobre alfombras o tocamos materiales aislantes como plásticos, etc. Este peligro aumenta en operaciones que demandan condiciones controladas de humedad baja.

3.2.3 MAGNITUDES:

3.2.3.1 GENERALIDADES: la magnitud de las cantidades de electricidad estática es diferente de la electricidad de potencia. La diferencia de potencial puede llegar a miles de voltios y las corrientes pueden ser menores que una millonésima de amperio y las resistencias de un millón de ohmios pueden provocar un cortocircuito.

3.2.3.2 VOLTAJES POSIBLES: los que se han observado en algunas industrias o se han creado en pruebas de laboratorio se presentan en la TABLA 6. En la TABLA 7 se puede ver que 30,000 voltios pueden saltar una distancia de una pulgada (25.4 mm). Esta chispa puede ser suficiente para encender mezclas inflamables.

TABLA 6

RANGO DE VOLTAJES ESTATICOS
PRODUCIDOS EN DIFERENTES PROCESOS

Tipo de equipo	Rango de voltaje observado (kV)
fajas	60-100
textiles	15-80
papeleras	5-100
camión tanquero	hasta 25
bandas transportadoras	hasta 45

TABLA 7

VOLTAJE DE RUPTURA DE C.D.
PUNTO A PLANO

DISTANCIA		VOLTAJE (kV)	
(pulg.)	(mm)	PUNTO +	PLANO +
0.197	5	6	11
0.394	10	16	18
0.591	15	20	29
0.787	20	25	39
1.181	30	36	57
1.575	40	42	71
1.969	50	50	85
2.362	60	54	98
2.756	70	60	112
3.150	80	63	124
3.543	90	67	140

3.2.4 CONDICIONES NECESARIAS PARA QUE LA CARGA ESTATICA PROVOQUE ENCENDIDO:

Para que una chispa debida a carga estática provoque encendido de una mezcla de vapor combustible-aire, debe existir suficiente energía almacenada en el cuerpo cargado. La cantidad de energía almacenada y disponible para una descarga del tipo capacitivo se puede calcular por la fórmula:

$$E = \tfrac{1}{2} C V^2 (10^{-9})$$

C: capacitancia en picoFaradios V: potencial en Voltios E: energía en milijoules

La energía necesaria para la ignición depende de varias variables, tales como: forma y espaciamiento entre los electrodos donde ocurrirá la chispa y la composición, temperatura y presión de la mezcla de gas.

Las pruebas demuestran que 0.25 mJ son capaces de encender una mezcla óptima de gas de hidrocarburo saturado y aire; pero si la diferencia de potencial es menor de 1,500 voltios y la capacitancia es menor de 222 pF, la chispa que resulta no es suficiente para encender esa mezcla, porque la energía desarrollada es menor de 0.25 mJ.

El gas de acetileno que se usa en las plantas industriales, para cortar metales, es excepcionalmente inflamable; sólo necesita 0.02 mJ de energía de chispa para encender.

Los valores aproximados de capacitancia, en picofaradios, de algunos objetos son:

cuerpo humano	100 - 400 pF
automóviles	500 pF
camión tanquero (2,000 galones)	1,000 pF
tanque aislado (12' de diámetro)	100,000 pF

Para que la electricidad estática provoque ignición, además de que se necesita suficiente energía en la descarga de la chispa, se debe tener una mezcla adecuada. Si es muy rica o muy pobre, no se producirá la ignición.

3.2.5 MEDIDA Y DETECCION DE LA ELECTRICIDAD ESTATICA:

3.2.5.1 GENERALIDADES: la electricidad estática tiene diferentes magnitudes de cantidades eléctricas que las que se tienen en potencia eléctrica, por lo tanto, los aparatos son diferentes. Veremos algunos de ellos.

3.2.5.2 VOLTIMETRO ELECTROSTATICO: como las cargas estáticas se caracterizan porque tienen voltaje alto y energía baja, debemos usar instrumentos que tomen muy poca o nada de corriente. El voltímetro electrostático no tiene buena exactitud, pero es suficiente para medir voltajes para análisis electrostáticos. Vienen en rangos desde 100 hasta 5,000 voltios. Operan con el principio de atracción electrostática entre veletas metálicas estacionarias y móviles. Prácticamente no circula corriente para mantener la deflexión. Hay modelos portátiles; son relativamente caros, no son resistentes, son poco sensibles y no indican la polaridad.

3.2.5.3 PROBADOR DE LAMPARA DE NEON: es muy barato y muy sensible. Se puede llevar en el bolsillo para probar en cualquier momento. Se enciende cuando un terminal se conecta a tierra o se toca con la mano y el otro se acerca al cuerpo cargado con potenciales de 100 voltios o más. Se pueden poner en serie-paralelo y con pequeños condensadores para lograr información aproximada sobre la cantidad.

3.2.5.4 ELECTROMEDIDOR DE ESTADO SOLIDO: se puede usar para detectar la presencia de electricidad estática, pero debe tener una impedancia de entrada muy alta para limitar la corriente que toma. Los hay con impedancias de 10^{15} ohmios.

Usan elementos de estado sólido especiales con efecto de campo, que tienen resistencia alta y toman muy poca corriente. Usa baterías, por lo que se debe encender antes de entrar a una zona cargada y se debe apagar al salir de ella.

3.2.5.5 AMPLIFICADOR ELECTROMEDIDOR: este instrumento se usa en investigación de la electricidad estática, en el campo y en el laboratorio. Ocupa resistencia alta en el circuito de entrada, para que drene poca corriente. Se puede usar como voltímetro, carguímetro o medidor de corriente. Es sofisticado y caro y se necesita personal especializado para usarlo.

3.2.5.6 VOLTIMETRO DE GENERACION: a veces se llama "field mill" (fábrica de campo) es un equipo que mide la intensidad del campo eléctrico y produce una corriente alterna, proporcional al campo eléctrico, por inducción electrostática, así como un alternador convencional produce corriente alterna por inducción electromagnética.

Esta corriente alterna se amplifica electrónicamente, luego se rectifica y la salida se alimenta a un indicador medidor. Generalmente tiene un condensador variable impulsado por motor o capas de condensadores que vibran linealmente cuando se exponen al campo eléctrico. El condensador sirve para recortar el campo eléctrico, creando una carga variable periódicamente que da una salida de corriente alterna. La salida se puede graficar para conocer las formas de los campos geométricos no simétricos.

3.2.5.7 MEDIDOR DE DENSIDAD DE CARGA: es una variación del voltímetro de generación que se diseña para trabajar inmerso en un líquido aislante y cargado. Se usa en un tubo o con una capa de geometría constante. Las señales se pueden interpretar en términos del ambiente eléctrico en que trabaja. La relajación de las cargas espaciales, en el medidor de densidad de carga, después de que el flujo para, nos da una medida de la conductividad del líquido en condiciones reales en el sistema, en el lugar del medidor.

3.2.5.8 DETECTOR DE ELECTRICIDAD ESTATICA: éste es un instrumento disponible comercialmente, que detecta la presencia de cargas estáticas y da alarma visual y audible. También tiene un indicador de la magnitud de la carga. Es portátil o se puede instalar permanentemente con un sistema de antena en el área de operación para enviar la señal si se presenta la estática. Algunos operan con baterías o con potencia de la red. A veces se ocupan para eliminar la posibilidad de chispas de arcos que se pueden producir por defectos o fallas. Las puntas de prueba que se usan en áreas con vapores explosivos se deben aislar efectivamente para evitar las chispas.

3.2.6 METODOS DE CONTROL ESTATICO:

3.2.6.1 GENERALIDADES: la generación de electricidad estática no se puede prevenir, pero se puede mitigar o controlar dando medios para juntar las cargas que se separan, tan rápidamente como se producen y antes de alcanzar los potenciales de chispeo. Los métodos que se usan son:
(1) Aterrizaje y conexión
(2) Control de humedad
(3) Ionización
(4) Pisos conductivos
(5) Calzado y rodos conductivos
(6) Precauciones especiales
(7) Mantenimiento apropiado

Para que el control sea efectivo estos métodos se pueden usar solos o combinados.

3.2.6.2 ATERRIZAJE Y CONEXION: muchos problemas de estática se pueden resolver uniendo las diferentes partes del equipo y aterrizando el sistema completo. La unión de dos o más objetos conductores reduce la diferencia de potencial entre los objetos conductores para prevenir la chispa entre los dos cuerpos, como podemos ver en las Figuras 47 y 48.

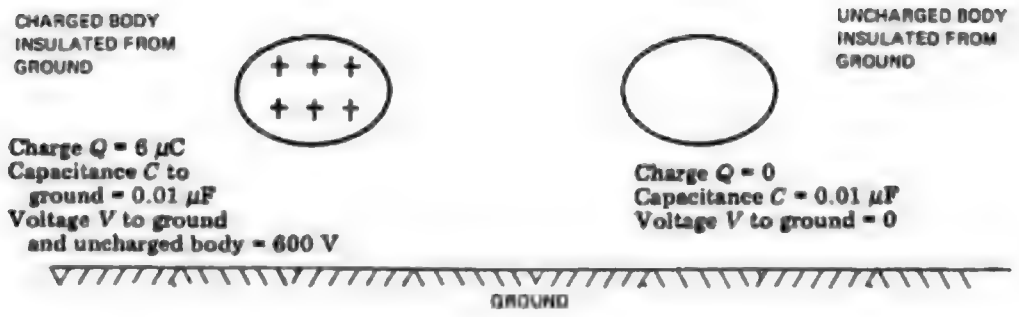


FIGURA 47 Cuerpos cargados y descargados y aislados de tierra

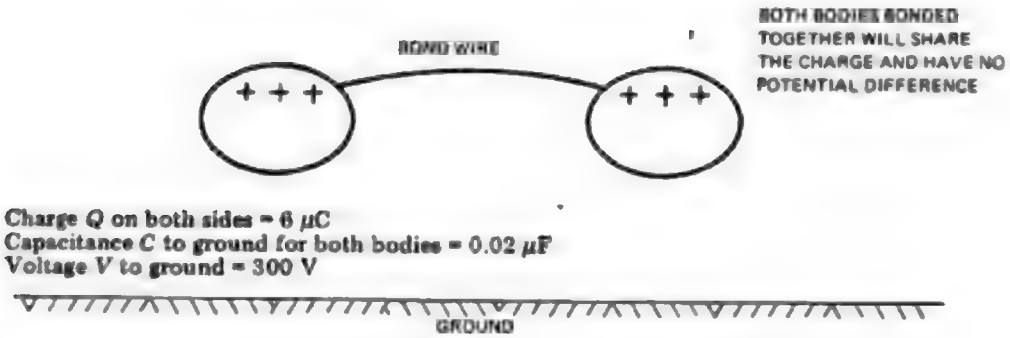

BOND WIRE
+ + +
+ + +
BOTH BODIES BONDED
TOGETHER WILL SHARE
THE CHARGE AND HAVE NO
POTENTIAL DIFFERENCE
Charge Q on both sides = 6 μC
Capacitance C to ground for both bodies = 0.02 μF
Voltage V to ground = 300 V
GROUND

FIGURA 48 Ambos cuerpos aislados comparten la misma carga

El aterrizaje reduce la diferencia de potencial entre los objetos y tierra, como se ve en la Fig. 49.

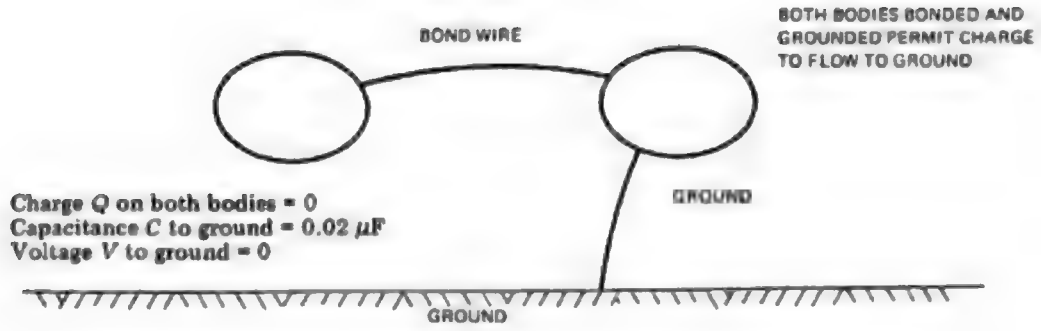

BOND WIRE
BOTH BODIES BONDED AND GROUNDED PERMIT CHARGE TO FLOW TO GROUND
GROUND
Charge Q on both bodies = 0
Capacitance C to ground = 0.02 μF
Voltage V to ground = 0
GROUND

FIGURA 49 Ambos cuerpos están aterrizados y no tienen carga

La unión y el aterrizaje se debe hacer con barras o conductores aislados # 6 ó # 4 AWG (por el esfuerzo mecánico), aunque la corriente sea del orden de los microamperios.

Cualquier tierra adecuada para los circuitos de potencia o para protección contra rayos, también es adecuada para la protección contra la electricidad estática.

Aunque una resistencia de 1 Megaohmio es suficiente para aterrizaje de la estática.

Donde el aterrizaje o la unión se exponen a daños mecánicos, se debe encerrar en ductos metálicos. Los equipos o tanques, que de todas maneras están en contacto inherente con tierra, no necesitan medios especiales de conexión o aterrizaje. Para los objetos móviles se usan escobillas, carbones, bronces o resortes, como vemos en la Fig. 50.

FIGURA 50 Métodos de aterrizaje de poleas o ejes: a) resorte de bronce b) bronce o carbón c) escobilla de carbón y soporte

Sin embargo, el aterrizaje no es la cura para todos los problemas de estática. Si el material que se está procesando es muy voluminoso y tiene características dieléctricas altas, la carga

estática de la parte superior estará aislada efectivamente de tierra y puede producir chispa de descarga.

En el caso de procesos que involucran materiales no conductores como: papel, telas o hule, no es posible drenar las cargas de electricidad estática por aterrizajes o uniones ordinarias. Las cargas también se pueden acumular en la superficie de los líquidos de baja conductividad, tales como los productos de petróleo refinado. Esas cargas no se pueden remover por aterrizaje o unión. En estos casos se usan otros métodos como ionización o humedificación.

3.2.6.3 CONTROL DE HUMEDAD: muchos materiales aislantes, como: cuero, madera, papel o concreto, contienen cierta cantidad de humedad en equilibrio con el aire que les rodea. Esta humedad o humedad relativa controla la conductividad de la superficie de esos materiales aislantes. A mayor humedad, mayor conductividad. Por ejemplo, la conductividad de la superficie de una placa de vidrio al 50% de humedad relativa es como 1,000 veces su conductividad al 20% de humedad.

En humedad normal (30% ó más), una película invisible de agua, da las trayectorias de fuga de muchos cuerpos sólidos aislantes para drenar sus cargas a la misma velocidad que se generan.

Cuando la humedad relativa es del 30% ó menos, los mismos materiales se secan y se convierten en buenos aisladores; se comienzan a notar las manifestaciones estáticas y se pueden provocar incendios por chispas estáticas.
Cuando la humedad alta no afecta adversamente al material, éste sería uno de los mejores métodos para controlar la electricidad estática.

La humedificación de la atmósfera total o localizada, especialmente cerca de los puntos donde se acumula la electricidad estática da buenos resultados cuando la electricidad estática produce adhesiones o repulsiones de hojas de papel, fibras, etc.

En algunos casos, la humedificación con chorro de vapor, da resultados satisfactorios sin incrementar la humedad en el área total. Es difícil determinar el valor mínimo de humedad relativa que se necesita para control de la electricidad estática, dependerá del proceso y de las condiciones ambientales.

Sin embargo, se cree que cuando la humedad relativa se mantiene entre el 60-70%, a temperatura interior ordinaria, las acumulaciones estáticas no alcanzan proporciones peligrosas.

Cuando los procesos se afectan adversamente con la humedad o donde la zona debe tener aire acondicionado para control del proceso o por confort y cuando la humedad no reduce considerablemente la resistividad (como la superficie limpia de muchos plásticos sintéticos y la superficie de muchos líquidos de petróleo) se deben considerar otros métodos de control estático.

3.2.6.4 IONIZACION: en el proceso de ionización, las moléculas de aire están sobretensionadas, los electrones se separan de sus moléculas. Los electrones son negativos y las moléculas quedan con cargas positivas. Cuando un cuerpo cargado se pone en contacto con aire ionizado, la carga estática se disipa. La carga se lleva a tierra, a través del aire ionizado, o bien, el cuerpo cargado atrae suficientes iones cargados positiva o negativamente, desde el aire, hasta que se neutraliza.

La ionización del aire se obtiene con una llama, campos eléctricos alternantes generados por luz ultravioleta de alto voltaje o radioactividad. Esto se puede lograr con diferentes equipos y métodos. Los más comunes son: el peine estático o neutralizador inductivo, el neutralizador eléctrico, el neutralizador radioactivo y las llamas abiertas.

El peine estático o neutralizador inductivo es un equipo barato que no se energiza eléctricamente. Es una barra metálica con varias puntas o agujas o alambre de metal, alrededor de una espiral metálica aterrizada (Fig. 51).

FIGURA 51 Colectores estáticos a) Espiral sobre barra de madera

b) cepillo de alambre en cuerpo metálico
c) Hilos de cobre o bronce enrollados en alambre

La ionización del aire ocurre en la concentración de carga en las puntas del colector, desde el campo eléctrico, dando cargas al objeto. El campo se concentra cerca de las puntas y cuando la carga está sobre un valor mínimo, se produce la ionización espontánea del aire.

Cuando colocamos el peine estático aterrizado cerca de un cuerpo aislado cargado, la ionización del aire en las puntas da suficiente conductividad para quitar alguna carga del objeto. Este método se ocupa para reducir la carga estática en cueros, papel y bandas de potencia.

El neutralizador eléctrico produce aire ionizado conductivo con conductores puntiagudos que se conectan a una fuente de alto voltaje. Cuando se coloca en las cercanías de cuerpos cargados estáticos o en movimiento, las cargas se neutralizan en la superficie o se drenan hacia algún cuerpo conductor aterrizado. Se energizan con el secundario de un transformador elevador pequeño (Fig. 52).

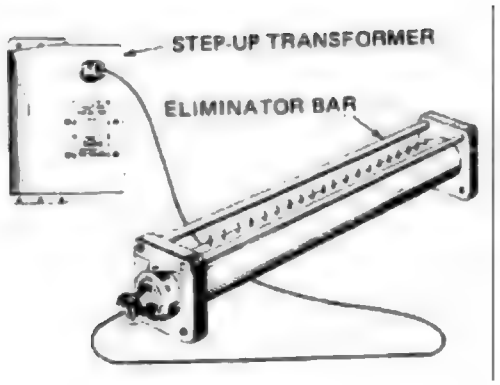


FIGURA 52 Neutralizador energizado eléctricamente

Los neutralizadores eléctricos se usan para remover cargas estáticas del algodón, lana, seda o papel en procesos, fabricación o impresión, pero no se recomiendan en atmósferas con vapores o gases inflamables. Se deben tomar las precauciones adecuadas para proteger al personal de operación y mantenimiento de los circuitos de alto voltaje.

Los neutralizadores radioactivos ionizan el aire por emisión de partículas alfa de materiales radioactivos como radio y polonio. Aquí se debe tomar muchas precauciones con los efectos de la radiación.

La ionización del aire se puede lograr con *filas de pequeñas llamas*, se usan en prensas de imprenta de papel, cuando no hay tinta inflamable.

3.2.6.5 PISOS CONDUCTIVOS: cuando se tienen condiciones extremadamente peligrosas, como en la fabricación de explosivos o con vapores inflamables enriquecidos con oxígeno o mezclas de gases susceptibles de ignición estática, se deben colocar pisos conductivos o cubiertas conductivas para prevenir la acumulación de carga estática, aterrizando al personal y a los objetos conductivos, porque el cuerpo humano puede acumular carga estática peligrosa en ambientes secos.

Los materiales son: hule conductor, plomo y otros compuestos conductivos.

La resistencia del piso debe ser inferior a 1 Megaohmio, cuando se mide entre dos electrodos colocados a una separación de 3 pies (0.91 m), en cualquier parte del piso.

Además, para proteger al personal contra los peligros de los choques eléctricos, la resistencia del suelo o piso debe ser mayor de 25,000 ohmios, cuando se mide entre un electrodo colocado en cualquier punto del piso y una conexión a tierra y entre dos electrodos colocados con una separación de 3 pies (0.91 m), en cualquier punto del piso.

Cada electrodo debe pesar 5 libras (2.27 Kg) y debe tener una superficie circular plana y seca con un área de contacto de 2 ½pulgadas (64 mm) de diámetro.

Se recomienda que el equipo eléctrico energizado desde un sistema aterrizado no lo use o no lo operen las personas paradas en el piso.

Si se usan ceras u otros tratamientos para pisos, deberán tener propiedades conductivas. Los pisos conductivos pueden incrementar su resistencia con el envejecimiento, por lo tanto, se deben probar cada cierto tiempo.

3.2.6.6 CALZADO Y RODOS CONDUCTIVOS: se usan en combinación con el piso conductivo. El equipo móvil debe tomar contacto directamente con el piso o a través de rodos conductivos de hule. Se debe verificar su resistencia siempre, antes de entrar al área de trabajo.

Hay probadores de zapatos que esencialmente son ohmnímetros de lectura directa con resistencias que limitan la corriente de cortocircuito a 0.5 miliamperios. La resistencia entre el zapato y tierra no debe exceder de 1 Megaohmio, que es la resistencia conductiva total del

calzado más la del piso.

3.2.6.7 PRECAUCIONES ESPECIALES: además de los pisos y calzados conductivos, se pueden considerar otros controles:

(1) Usar ropas que produzcan estática baja
(2) Establecer procedimientos rígidos de operación
(3) Usar tapetes conductivos de hule, cuando en alguna parte no hay piso conductivo

Estas medidas son comunes en los hospitales, por el peligro de los agentes anestésicos y por la posibilidad de crear electricidad estática en chorros, vestidos inadecuados de operadores, etc.

3.2.6.8 MANTENIMIENTO APROPIADO: como en otros equipos, los dispositivos de control estático no son mejores que el mantenimiento que reciben. Hay que hacer inspecciones periódicas para verificar:

(1) Uniones y conexiones a tierra intactas
(2) Verificar la resistencia a tierra de todos los equipos
(3) Examinar los neutralizadores estáticos para verificar si están en la posición correcta y si son del tipo alto voltaje, verificar si están energizados y si las puntas están limpias
(4) Probar las bandas para verificar si mantienen sus propiedades conductivas
(5) Tomar medidas de resistencia de los pisos conductivos y del calzado
(6) Tomar mediciones con instrumentos para determinar si las cargas estáticas se están acumulando, ya sea por la pérdida de algún neutralizador estático o porque han cambiado las condiciones de operación, tales como: velocidad de las máquinas, adición de algún equipo de manejo de material, uso de materiales nuevos que pueden tener características diferentes

3.2.7 PELIGROS EN DIFERENTES INSTALACIONES Y MECANISMOS Y METODOS DE CONTROL ESTATICO QUE SE PUEDEN APLICAR

3.2.7.1 GENERALIDADES: ahora veremos los peligros particulares en ciertas instalaciones y los métodos de control estático que se pueden aplicar.

3.2.7.2 INDUSTRIA DE LA AVIACION: las cargas estáticas se ganan en el aire y en tierra.

En el aire, por el contacto con partículas de polvo, humo, agua, nieve seca, cristales de hielo, etc., que generan cargas y también por las nubes cargadas que inducen electricidad en el avión.

En tierra las ganan de la misma forma que cualquier vehículo que se desplaza con llantas de hule. Aunque se encuentre detenido, el aire que se mueve sobre la gran superficie metálica del avión, genera cargas estáticas, aunque de magnitud menor.

Los incendios y explosiones pueden ocurrir durante las operaciones de carga de combustible, si no se tiene aterrizaje adecuado.

3.2.7.3 MOTORES CON FAJAS: muchas fajas de potencia y bandas transportadoras se construyen con materiales aislantes. Se ponen en contacto con las poleas y generan electricidad estática en el punto en que la faja se separa de la polea.

La generación de electricidad estática aumenta con la velocidad y con la disminución de humedad. La generación estática se producirá aunque la polea sea conductiva o no.

Las bandas planas de hule o cuero, a velocidades moderadas o altas pueden generar suficiente electricidad estática para producir chispas (las bandas en V no son tan susceptibles para generar estática como las bandas planas).

Las bandas transportadoras que manejan materiales sólidos se mueven a velocidad baja y generalmente no producen electricidad estática. Pero, si llevan materiales calientes o secos y operan en atmósferas calientes o se mueven a velocidades grandes, la generación estática puede ser significativa.

En los lugares en que las cargas estáticas llegan a ser peligrosas, se debe pensar en motores y engranes directos, en vez de fajas.

Si de todas maneras se ponen fajas, se pueden usar los siguientes métodos de control estático:

(1) Instalación de un colector estático aterrizado: es una pieza aterrizada, de hierro angular del ancho de la faja, con puntas metálicas soldadas a una separación de 1 pulgada (25.4 mm) en la esquina del hierro angular.

Las puntas no sobresalen a los lados del ángulo. El conjunto se instala a ¼ de pulgada (6.35 mm) de la faja, a unas 4-6 pulgadas (102-152 mm) desde el punto en que la faja abandona la polea, Fig. 53. Pueden soportar esfuerzos mecánicos.

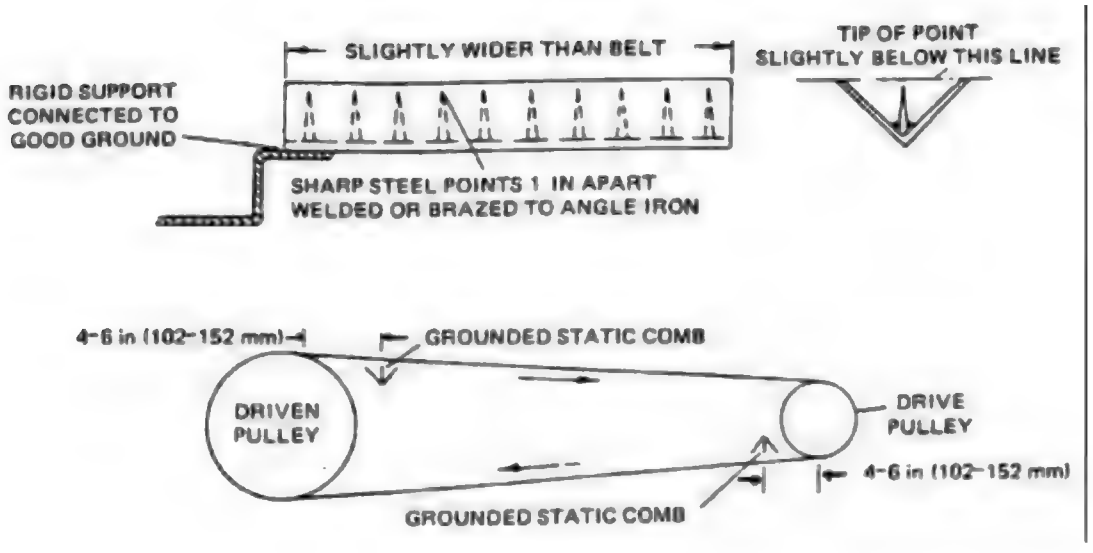


FIGURA 53 Detalles y localización del peine estático

(2) Usar fajas de material conductivo: se piden a los fabricantes de fajas. El punto importante es que tanto la faja como la polea se aterricen.

(3) Uso de cubiertas especiales para fajas: permite que la cubierta interior de la faja tenga suficiente conducción para regresar las cargas hacia la polea, a la misma velocidad con que se producen. Estas cubiertas se deben renovar periódicamente.

(4) Cuando el material que lleva la banda transportadora se derrama, al final, en una tolva, puede llevar carga estática. El soporte de la faja y la polea terminal se deben unir eléctricamente con la tolva.

(5) Las poleas metálicas se cargan igual y con sentido opuesto a la carga que se lleva la faja; esta carga se debe transferir hacia tierra, a través del eje, de los rodamientos y de la cubierta. Cuando la cubierta es conductiva, no queda carga atrapada; pero cuando se usan soportes de madera seca, se debe conectar a tierra el eje y los rodamientos, para disipar las cargas atrapadas.

(6) Algunas veces, el flujo de electricidad estática a través de la película de aceite provoca picaduras en la superficie de los rodamientos; en este caso, se debe mejorar la unión entre eje y rodamientos, para reducir la resistencia, por medio de escobillas o carbones. Hay que tener cuidado con los recubrimientos de nylon.

Un fabricante de fajas considera que una faja que tiene 10 Megaohmios, con una sección de 8 ½pulgadas cuadradas (5,484 mm^2), tendrá suficientes propiedades estáticas para que la faja tenga seguridad por toda su vida.

Aunque la resistencia es alta, la carga estática se puede disipar satisfactoriamente, sin embargo, es conveniente mantener la resistencia lo más baja posible, para ganar algún margen de seguridad.

Un método para probar fajas es colocar dos electrodos de 5/8" (15.9 mm) de diámetro, separados 8 ½pulgadas (216 mm). Los electrodos se deben humedecer y se deben apretar con 3 librasfuerza/pulgada cuadrada (20.7 KN/m^2). Luego se puede medir la resistencia con un megóhmetro estándar de 500 voltios.

3.2.7.4 INDUSTRIA DEL CARBON: en las minas de carbón y en la industria de preparación de carbón se han producido explosiones por culpa del polvillo de carbón y de partículas pequeñas en el ambiente. Aquí se deben tomar otras precauciones, además de prevenir la acumulación de carga estática, como: buen mantenimiento, ventilación apropiada y prevención de la acumulación de polvillo.

3.2.7.5 INDUSTRIA DE HARINAS Y GRANOS: el manejo de materiales por medio de bandas transportadoras, elevadores, al vacío, sistemas de ventilación y otras máquinas de manufactura, pueden ser responsables de la acumulación de cargas y de la descarga estática que resulta.

Las partículas finas de granos, suspendidas en el aire, constituyen un explosivo excelente. Ya se han conocido explosiones en elevadores de granos, producidas por chispas estáticas.

La TABLA 8 ilustra la energía eléctrica mínima que se necesita para encender algunos

polvos en una nube o en capas o planos.

Material	Dust Cloud mJ	Dust Layer mJ
Alfalfa	320	—
Allyl alcohol resin	20	80.0
Aluminum	10	1.6
Aluminum stearate	10	40.0
Aryl sulfonyl hydrazine	20	160.0
Aspirin	25	160.0
Boron	60	—
Cellucotton	60	—
Cellulose acetate	10	—
Cinnamon	40	—
Coal, bituminous	60	560.0
Cocoa	100	—
Cork	35	—
Cornstarch	30	—
Dimethyl terephthalate	20	—
Dinitro toluamide	15	24.0
Ferromanganese	60	8.0
Gilsonite	25	4.0
Grain	30	—
Hexamethylenetetramine	10	—
Iron	20	7.0
Magnesium	20	0.24
Manganese	60	3.2
Methyl methacrylate	15	—
Nut shell	50	—
Paraformaldehyde	20	—
Pentaerythritol	10	—
Phenolic resin	10	40.0
Phthalic anhydride	15	—
Pitch	20	6.0
Polyethylene	30	—
Polystyrene	15	—
Rice	40	—
Seed (clover)	40	—
Silicon	60	2.4
Soap	60	3840.0
Soybean	50	40.0
Stearic acid	25	—
Sugar	30	—
Sulfur	15	1.6
Thorium	5	0.004
Titanium	10	0.008
Uranium	45	0.004
Urea resin	80	—
Vanadium	60	8.0
Vinyl resin	10	—
Wheat flour	50	—
Wood flour	20	—
Zinc	100	400.0
Zirconium	5	0.0004

*Data from the US Bureau of Mines.

TABLA 8 Energía eléctrica mínima para encender algunas nubes de polvos y estratos

3.2.7.6 PROCESAMIENTO DE GASES: los gases no contaminados no generan electricidad estática; pero, si se mueve con contaminaciones de óxidos metálicos, partículas escamadas o partículas de líquidos, pueden producir electrificación. Los gases de petróleo licuado se comportan de la misma forma.

El aire comprimido contiene partículas de vapor de agua condensada y líquidos de dióxido de carbono; el gas de hidrógeno contiene partículas de óxido y vapor; cuando se descargan por un orificio, pueden producir acumulación estática en el equipo de descarga y en el que recibe la descarga.

3.2.7.7 INDUSTRIA DE PINTURAS: el uso de solventes inflamables, en las operaciones de mezcla de pinturas, representa peligro de incendio y explosiones, por el encendido de chispas estáticas que se pueden generar al transferir los líquidos de los recipientes abiertos, ya sea por el equipo de llenado, por las máquinas con fajas o por los mismos trabajadores.

3.2.7.8 INDUSTRIA DEL PAPEL Y DE IMPRENTA: el mismo movimiento del papel por los rodillos y por la máquina de fabricación tiende a producir voltajes estáticos.

Cuando se usan tintas y solventes inflamables, existe el peligro de incendios y explosiones ocasionales. La carga estática, también es problemática desde el punto de vista de la producción. Las hojas cargadas se pegan con otros objetos y se dificulta su control y manejo, con el peligro de que se rompan. De la misma forma, los impresos se pueden dañar por la atracción de partículas de polvo y fibras de papel que se pegan sobre la impresión

3.2.7.9 INDUSTRIA DE REFINADO: en esta industria es donde más se conocen los peligros de incendio y explosiones por encendidos estáticos. Aquí se deben tomar extensas medidas de precaución para salvar vidas y propiedades.

3.2.7.10 PROCESAMIENTO DE POLVOS: cuando se suspenden como nubes de polvo, en el aire y con suficiente concentración, son explosivos y se pueden encender por chispas estáticas. Además de las precauciones contra cargas estáticas, se debe ventilar adecuadamente, los edificios y las maquinarias. En la fabricación de explosivos, la sensibilidad depende del material que se procesa. Los fulminantes de mercurio se pueden detonar con chispas estáticas.

3.2.7.11 INDUSTRIA DEL CAUCHO: en la fabricación de productos de hule, se usa cementos con porcentajes altos de nafta. Las cargas estáticas que se generan en diferentes puntos del proceso pueden producir el encendido de los vapores de nafta.

Para controlar la electricidad estática, se debe mantener una humedad relativa del 50% o más, y, además, se usan conexiones y aterrizajes y eliminadores estáticos.

Los operarios no deben usar zapatos con suela de hule para evitar la acumulación de carga estática en sus cuerpos.

Los líquidos inflamables, con punto de encendido bajo, se deben manejar en sistemas cerrados o recipientes cerrados. Cuando se transfiere líquido inflamable, de un recipiente abierto a otro abierto, los recipientes se deben interconectar para que tengan el mismo potencial y luego se aterrizan para evitar la posibilidad de chispas.

Las máquinas cubiertas con gomas son especialmente sensibles a los incendios por vapores o líquidos inflamables, debido a las descargas de la electricidad estática que se genera en el

movimiento de rodillos y fajas.
3.2.7.12 INDUSTRIA TEXTIL: los peligros de electricidad estática se reducen usando sistemas modernos de limpieza, para quitar las hilachas, del ambiente y de las máquinas y con los equipos modernos de aire acondicionado y controlando con precisión la humedad. Los telares se unen y se aterrizan y la humedad relativa se mantiene entre el 60 - 70%.

3.2.7.13 HOSPITALES: los peligros se presentan por las mezclas de aire con ciertos anestésicos y por el uso de atmósferas con oxígeno enriquecido.

Las áreas peligrosas son las que contienen agentes anestésicos como: éter etílico, ciclopropano, éter divinyl, éter etílico triflúor y etileno.

Las medidas de seguridad para estas zonas son: pisos conductivos, materiales metálicos o conductivos para el mobiliario, zapatos conductivos para el personal, prohibición de sedas, lana y vestidos sintéticos, excepto las medias y ropa interior que está en pleno contacto con la piel.

La humedad relativa se mantiene por encima del 50%, se aterrizan todas las partes metálicas no conductoras de electricidad de los equipos eléctricos, tales como: lámparas portátiles, instrumentos, accesorios, gabinetes y estuches.

En este caso, se incrementa el peligro de aterrizar los equipos eléctricos, por los zapatos y pisos conductivos. El mantenimiento del equipo eléctrico se debe atender mejor, para reducir los peligros de choques eléctricos.

Los desarrollos recientes indican que al aterrizar las cubiertas metálicas, no conductoras de electricidad, de los aparatos que se usan en salas de operación y unidades de cuidados intensivos, tales como: electrocardiógrafos, osciloscopios, defibriladores, marcapasos, aparatos de radio, de televisión, generadores de vapor y equipos de cauterización, se puede aumentar el peligro de choques en los pacientes y en el personal, por las corrientes de fuga en el conductor de aterrizaje.

Los pacientes de las unidades de cuidados intensivos corren más peligro. Las corrientes de fuga, tan pequeñas como 20 microamperios, pueden ser fatales si pasan por los circuitos que monitorean las funciones fisiológicas y entran al paciente, a su interior.

Para estar seguros, los circuitos se deben diseñar para que la corriente de fuga no exceda de 10 microamperios.

3.2.7.14 LIMPIEZA: "dry cleaning" es el proceso, por medio del cual se remueve suciedad, grasa, pintura y otras manchas en ropas, productos textiles, alfombras, etc., usando líquidos no acuosos (solventes). Hay tres métodos:

(1) Inmersión y agitación en vasijas cerradas
(2) Cepillado o restregado con solventes de limpieza
(3) Procesamiento de fase doble

Los sistemas de limpieza se clasifican en los siguientes tipos:

TIPO I	Ocupan solventes con punto de ignición debajo de 100º F (36.8º C) [PROHIBIDO]
TIPO II	Ocupan solventes con punto de ignición entre 100 y 140º F (36.8 y 60º C)
TIPO III A	Ocupan solventes con punto de ignición entre 140 y 200º F (60 y 93.3º C)
TIPO III B	Ocupan solventes con punto de ignición sobre 200º F (93.3º C)
TIPO IV	*Ocupan solventes que no sostienen la combustión y no encienden a* temperaturas ordinarias o bajas y cumplen ANSI/NFPA 32-1990, Cap. 4
TIPO V	Igual que IV, pero cumplen ANSI/NFPA 32-1990, Cap. 5

Se debe unir y conectar a tierra: los tanques de almacenamiento, los tanques de tratamiento, purificadores, bombas, tuberías, lavadoras, extractores, secadoras, etc.

Se debe tener cuidado especial con las telas. Cuando se trasladan de una parte del equipo a otra, las dos partes se deben estar unidas. La humedificación del área ayudaría a disipar el peligro de la carga estática.

El personal que trabaja en estas áreas y desarrolla las operaciones de limpieza, puede acumular carga estática y el calzado lo puede aislar de tierra; por lo tanto, se recomienda: pisos conductivos, mesas de trabajo metálicas aterrizadas y zapatos conductivos.

3.2.7.15 OFICINAS: las máquinas que manejan cintas de papel y plástico, hojas o tarjetas, acumulan cargas estáticas. Esto interfiere con las operaciones de las máquinas, si los papeles se atraen o si los papeles atraen suciedad, hilachas, polvo, etc., pero también les pueden dar choques pequeños a los operarios.

El problema es que aunque los choques sean pequeños, las acciones reflejas involuntarias pueden causar daños mayores.

Aterrizando todas las partes metálicas no conductoras de electricidad, de las máquinas, se previene la acumulación de cargas, pero no se eliminan las dificultades de operación que se podrían controlar con humedad o con neutralizadores estáticos.

3.2.7.16 TERMINALES DE VIDEO Y OTROS EQUIPOS ELECTRONICOS SENSIBLES: (Vea Cap. 5)

3.3 ATERRIZAJE PARA PROTECCION CONTRA RAYOS

3.3.1 NATURALEZA DEL RAYO:

3.3.1.1 GENERALIDADES: el rayo es la descarga de celdas de potencial alto (generalmente negativas), entre nubes o a tierra. Esas celdas cargadas en las nubes atraen cargas de polaridad opuesta sobre la superficie de (o en objetos altos) la tierra, directamente debajo de ellas.

Cuando la carga de la celda alcanza un nivel crítico (cuando se rompe el aislamiento entre la nube y tierra), se establece una trayectoria ionizada escalonada, frecuentemente a tierra, produciendo una corriente elevada de descarga (de golpe), que neutraliza momentáneamente esas cargas de las nubes y tierra.

La corriente de descarga aumenta desde cero hasta un máximo, en un tiempo de 1 a 10 microsegundos, luego declina a la mitad del valor pico en un tiempo de 20 a 1,000 microsegundos.

Usualmente, la descarga tiene varias componentes. A la componente original, que crece lentamente, le siguen, en promedio, tres componentes subsecuentes en tiempos de hasta 0.5 segundos y resultan de que el centro de la carga original en la nube se recarga con las descargas internas desde otros centros de carga en la nube.

Estas componentes subsecuentes se desarrollan mucho más rápidamente que la componente original, con velocidades de crecimiento de dos a diez veces que la componente original.

También se ha encontrado que la velocidad de crecimiento no es lineal, como generalmente se ha considerado en el pasado, sino que exponencial, con velocidades rápidas de crecimiento en los últimos décimos de microsegundo del tiempo de crecimiento.

Esto es importante en los aspectos de protección contra rayos donde el voltaje contra el que nos queremos proteger es el producto de la velocidad de crecimiento de la corriente (di/dt) y la inductancia mutua de un conductor en el campo magnético del lugar de una descarga.
La longitud de un conductor que se puede afectar puede exceder las 2 millas.

La máxima velocidad de crecimiento de un 7% de las componentes de descargas subsecuentes excede 100,000 A/microsegundo. La Fig. 54 muestra las velocidades relativas

Estas componentes múltiples dan la apariencia de centelleo de las descargas eléctricas.

El valor promedio de la corriente pico de descarga es cerca de 40,000 A, aunque algunas corrientes pico de descarga pueden llegar hasta 270,000 A.

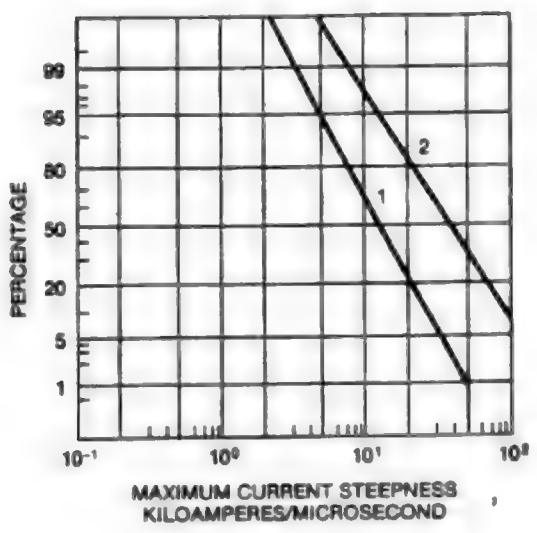


FIGURA 54 Distribución de la frecuencia acumulada de las velocidades máximas de crecimiento de las corrientes de descarga 1. Primera descarga negativa 2. Subsecuentes descargas negativas

El punto en que se produce una descarga, generalmente es un punto elevado, como: un árbol, un edificio, una línea de transmisión y sus torres o alguna estructura elevada similar.

Puede ser sobre una estructura metálica, que es buen conductor, o puede ser sobre algo que se considere semiconductor, como por ejemplo:
(1) Arboles con capas húmedas debajo de su corteza
(2) Estructuras de madera con superficies húmedas o mojadas o con residuos de humedad en las maderas, tuberías internas o alambrado
(2) Estructuras de mampostería, con superficies mojadas o con huellas o grietas húmedas en su superficie interna
(4) Estructuras de concreto con material de refuerzo, posiblemente con secciones que no se unieron

Estas trayectorias son suficientemente conductivas como para permitir el flujo de cargas de polaridad opuesta a las de la nube cercana, pero no permiten que fluya la corriente fuerte de golpe, sin calentamientos fuertes o sin efectos mecánicos. Esto se debe a la resistencia elevada de esta trayectoria de descarga.

Probablemente, lo más violento sea la vaporización explosiva de cualquier humedad, como en el caso de las cortezas de los árboles o las grietas húmedas de los edificios de mampostería. La corteza salta del árbol y se lanzan astillas y pedazos, por la presión del vapor en la estructura.

En los puntos donde los materiales de refuerzo no están unidos, también se rompe este material. Los miembros estructurales de madera explotan por la vaporización de la humedad, los metales pequeños se deforman por los esfuerzos magnéticos de la corriente de descarga.

Los peligros aumentan si hay materiales inflamables, como petróleo o algunos químicos o explosivos. La temperatura en el terminal de la descarga o en cualquier punto de la trayectoria, que tenga resistencia elevada, en el viaje de la corriente a tierra, es suficiente para encender esos materiales.

Aunque la descarga no ocurra en un punto en particular, pero sí ocurre en un punto cercano o en otro punto de la nube, la disipación de la carga en la nube provoca la disipación de las cargas, en el punto elevado de tierra.

El retorno a tierra de esas cargas se conoce como descargas inducidas y puede alcanzar varios cientos de amperios, puede dañar algunos materiales sensibles, como los inflamables o explosivos.

También se dañan los equipos eléctricos e instrumentos de bajo voltaje. La protección contra descargas inducidas se logra con las mismas protecciones contra las descargas directas.

Los rayos pueden provocar daños en las estructuras por el golpe directo y a los equipos eléctricos por los pulsos que viajan en las líneas expuestas.

Estos pulsos se producen como resultado directo del golpe sobre la línea o por voltajes inducidos electrostáticamente. El daño por el golpe directo se puede reducir dando una trayectoria de resistencia baja a tierra.

3.3.1.2 NECESIDAD DE PROTECCION: los daños a las estructuras y la protección contra rayos no se verá en este curso, excepto en lo que involucre la conexión a tierra. No es posible proteger una estructura contra los daños de los golpes directos, a menos que la encerremos completamente en una caja metálica. Pero, también es cierto, que no todos los cuerpos necesitan protección, dependiendo del lugar y tipo de instalación. Hay que atender un grupo de factores para definir si se necesita protección, éstos son:

(1) Peligros al personal
(2) Posibles pérdidas de producción, incluyendo pérdidas indirectas y secundarias
(3) Posibles daños y costos de reparación
(4) Efecto de los castigos de las compañías aseguradoras
(5) Valor y naturaleza de la estructura y sus partes
(6) Frecuencia de los truenos y rayos (mapa isoceráunico de Figs. 55, 56 y 56a)
(7) Número y severidad de los rayos por tormenta, en promedio
(8) Costo de la protección

El orden de estos factores está, aproximadamente, en el orden de importancia, aunque en algunos casos este orden puede cambiar.

El número de días con rayos por año, en una región determinada, se conoce como NIVEL ISOCERAUNICO de la región. Para Estados Unidos, Canadá y El Salvador se presentan en las Figs. 55, 56 y 56a. Sin embargo, hay variaciones locales que dependen de la topografía, del contenido de minerales y humedad que este mapa no toma en cuenta.

También, hay áreas donde tales tormentas son más intensas y otros lugares donde hay más tormentas por año, por lo que las Figs. 55, 56 y 56a se deben modificar para tomar en cuenta estas variaciones locales.

En el apéndice I del Código ANSI-NFPA 78-1989 se presenta una guía asesora de riesgos para protección contra rayos.

La Fig. 56a es el mapa de niveles isoceráunicos de El Salvador.

La Fig. 57 es un mapa de la densidad de las descargas eléctricas anuales medias.

3.3.2 EQUIPOS Y ESTRUCTURAS QUE SE DEBEN CONSIDERAR:

Se pueden separar en cinco clases, según sus necesidades de protección:

(1) La primera clase no necesita o necesita muy poca protección adicional, y el único requisito es que se conecten efectivamente a un electrodo de tierra. Esta clase incluye:

    (a) Todas las estructuras metálicas, excepto los tanques u otros recipientes de materiales inflamables

    (b) Tanques de agua, silos y estructuras metálicas construidas con mucho metal

    (c) Astas de bandera de material conductivo

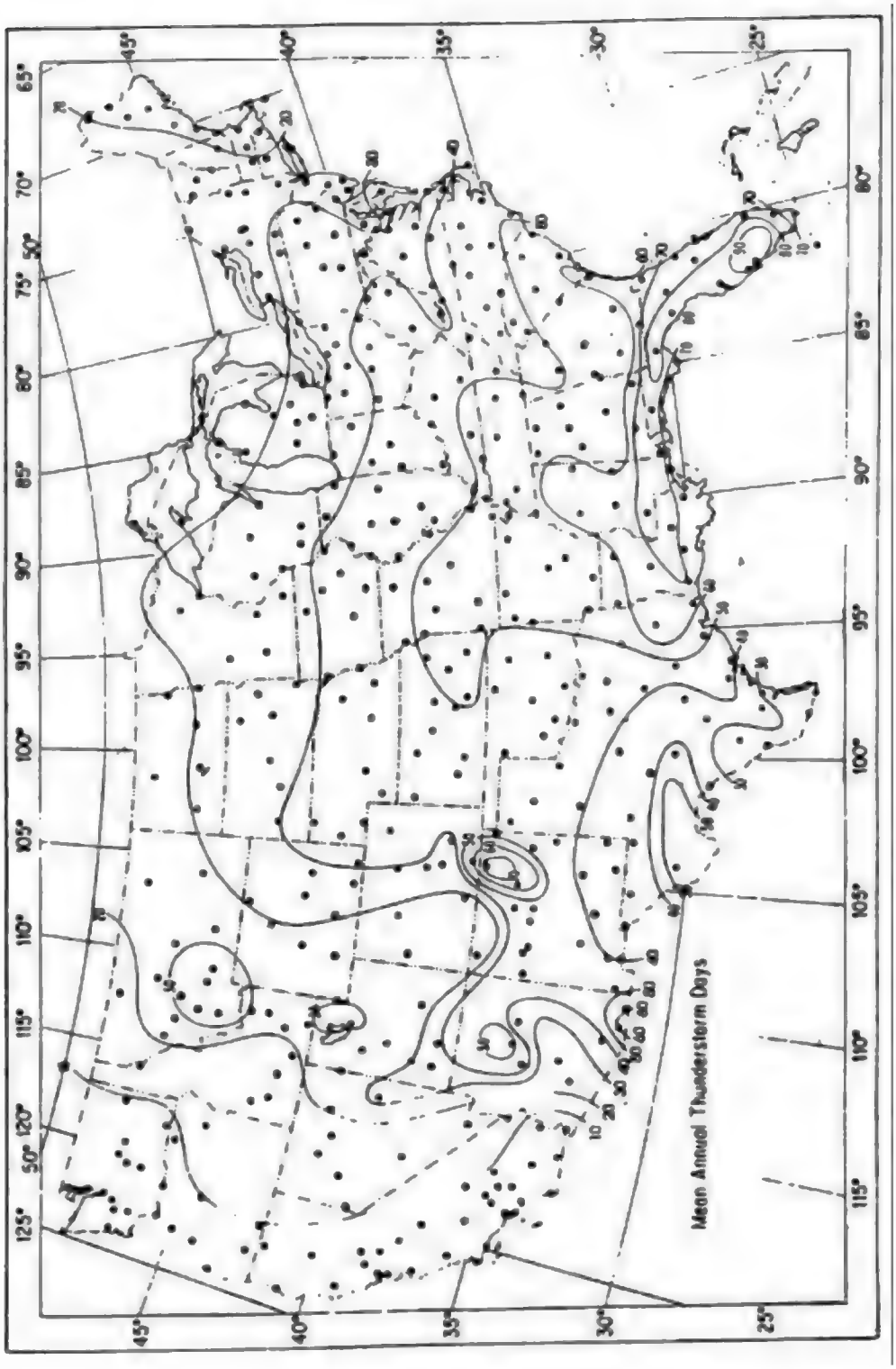


FIGURA 55 Mapa isoceráunico anual de los Estados Unidos Continentales, mostrando el

número medio anual de días con truenos

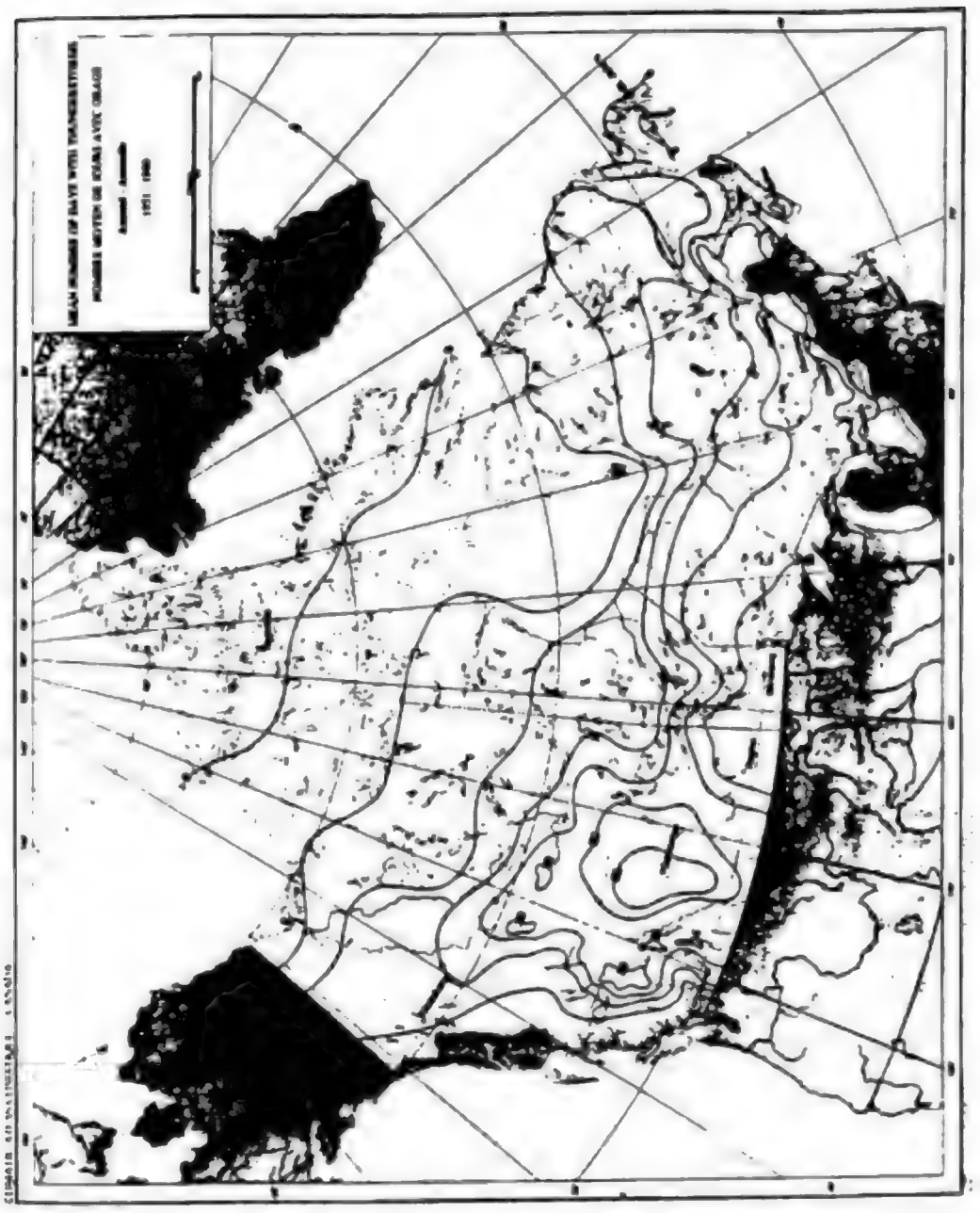


FIGURA 56 Mapa isoceráunico anual de Canadá

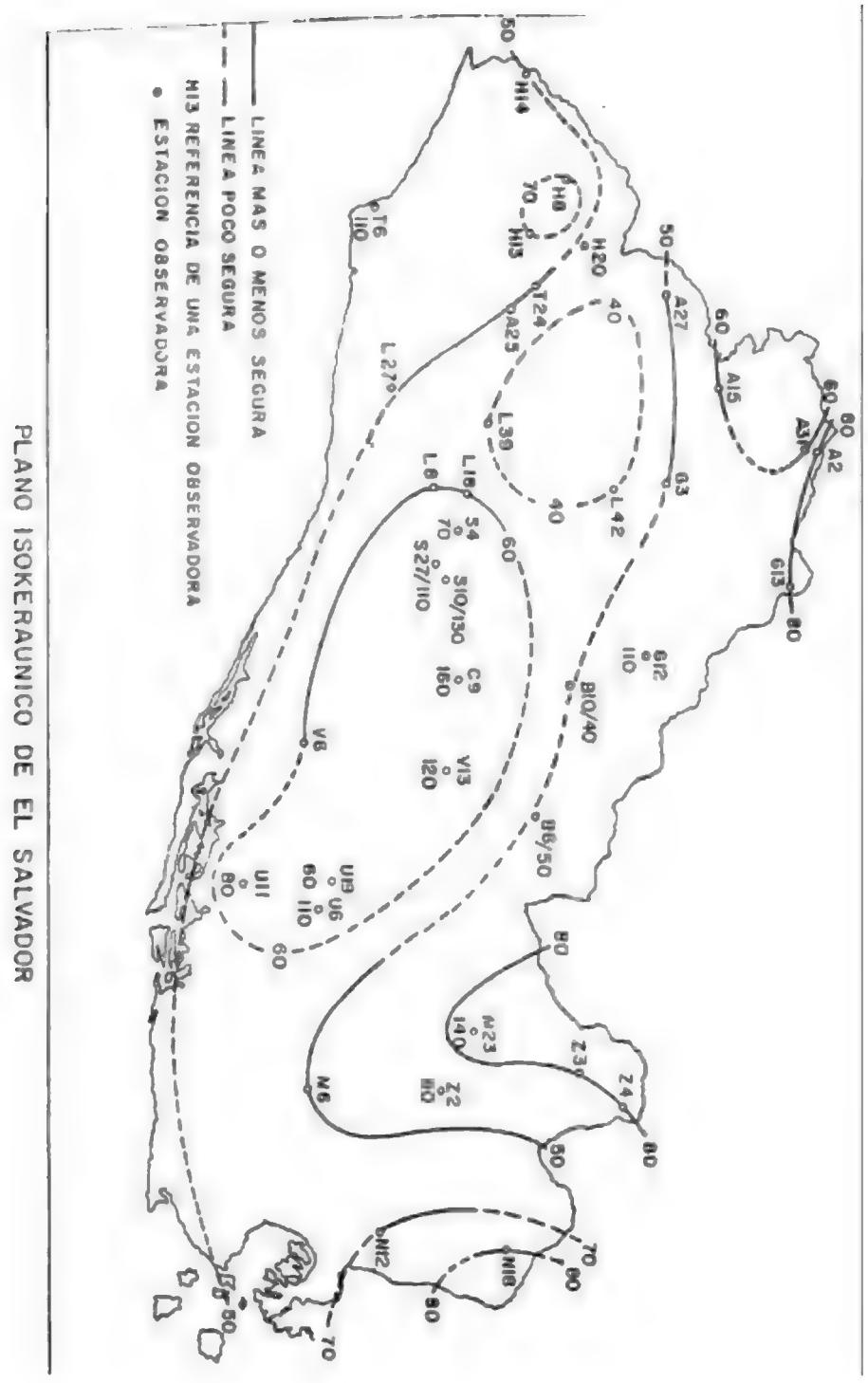

PLANO ISOKERAUNICO DE EL SALVADOR
LINEA MAS O MENOS SEGURA
LINEA POCO SEGURA
H13 REFERENCIA DE UNA ESTACION OBSERVADORA
• ESTACION OBSERVADORA

FIGURA 56(a) MAPA ISOCERAUNICO DE EL SALVADOR

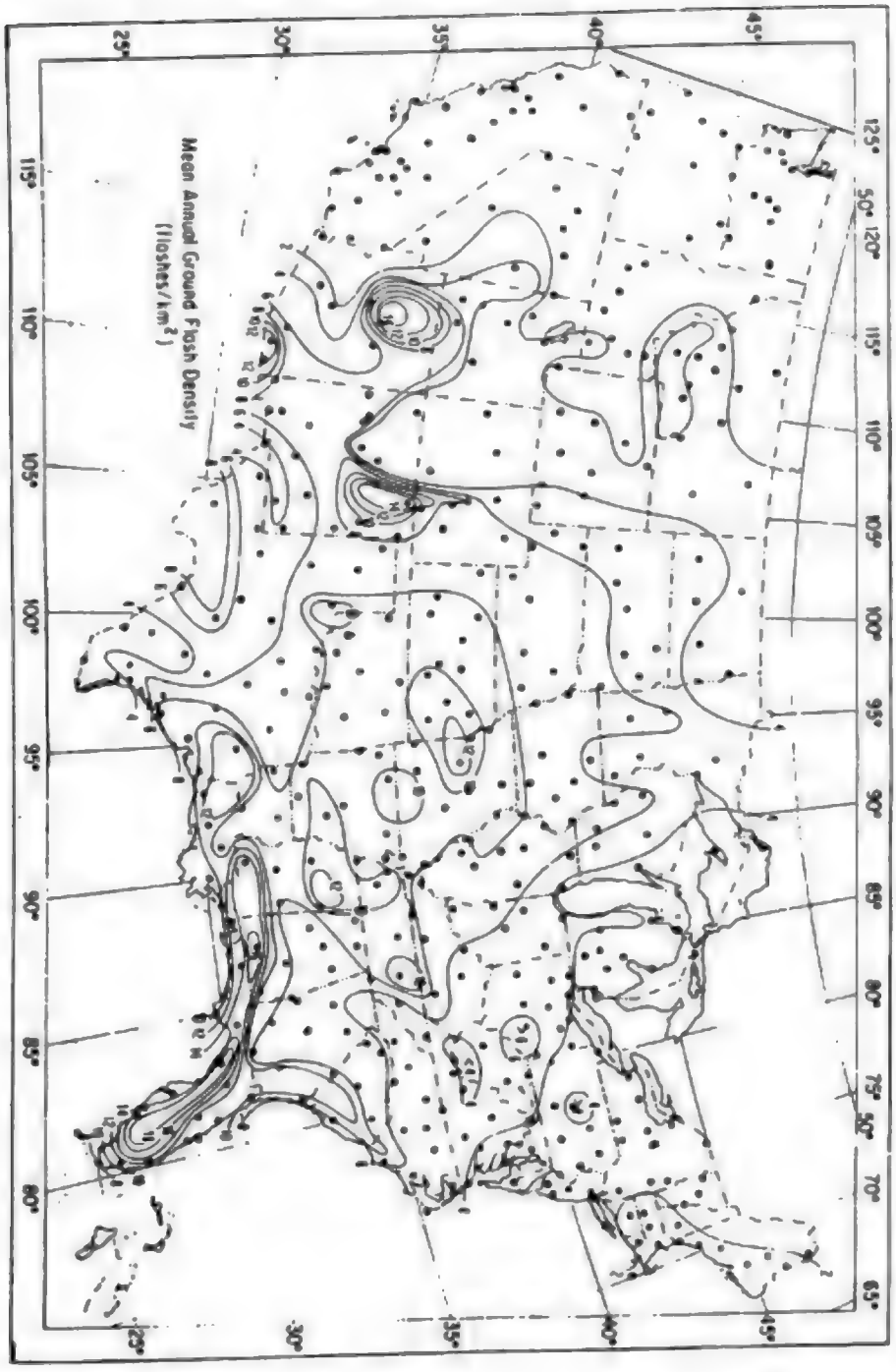


FIGURA 57 Mapa de densidad de medias anuales de descargas eléctricas

(2) La segunda clase son los edificios con superficies conductivas y estructuras no conductivas, como los techados con metal y los recubiertos con metal. Necesitan conductores de conexión a tierra, hacia electrodos apropiados.

(3) La tercera clase son los edificios con estructuras metálicas y fachadas no conductivas. Necesitan de terminales conductores apropiados que se conectan a la estructura, encima y debajo de la fachada para trabajar como punto terminal para los rayos y para evitar la perforación de la fachada.

(4) La cuarta clase son estructuras no metálicas. Necesitan tratamiento extenso de protección. Se trata de:

(a) Edificios de madera, piedra, ladrillo, losa u otros materiales no conductores, sin miembros metálicos de refuerzo
(b) Pilas y chimeneas altas. Aunque tengan elementos de refuerzo, deben tener protección contra rayos; tales como: terminales aéreos, conductores de bajada y electrodos de aterrizaje

(5) La quinta clase son los que tienen consecuencias graves de riesgo o pérdida y se les da tratamiento completo de terminales aéreos o derivadores, conductores de bajada y electrodos de aterrizaje. Estos son:

(a) Edificios de gran valor estético, histórico o intrínseco
(b) Edificios con materiales combustibles o explosivos
(c) Estructuras que contienen sustancias que pueden ser peligrosas si se escapan por los efectos de los rayos
(d) Tanques y graneros
(e) Plantas de potencia y estaciones de bombeo de agua
(f) Líneas de transmisión
(g) Estaciones y subestaciones de potencia

Las instalaciones de servicio público tienen funciones sumamente importantes, por lo que se deben proteger adecuadamente.

3.3.3 REQUISITOS PARA PROTECCION BUENA:

3.3.3.1 PRINCIPIOS DE PROTECCION: los rayos no se pueden prevenir, sólo se pueden interceptar y derivar por trayectorias que, si se diseñan y construyen correctamente, no representan peligro. En todo caso, sólo se alcanzan protecciones hasta del 99.5 - 99.9%

La protección completa sólo se logra metiendo el objeto en cápsulas totalmente metálicas. Por ejemplo, una persona en un automóvil cerrado y con capota metálica.

Un nivel de protección del 99.5% reducirá la incidencia de rayos directos a un rayo cada 30 años (que es normal en un nivel isoceráunico de 30 para estructuras elevadas de 30 pies (9.1 m) de altura y 100 (30 m^2) pies cuadrados), hasta un rayo cada 6,000 años.

En tanto que, una protección del 99.9% reduce la incidencia de un rayo por cada 30,000 años. Se prefiere la protección contra descargas del 99.5%.

La teoría fundamental contra descargas se basa en dar trayectorias por donde la descarga entre o salga de tierra, sin pasar por las trayectorias de resistencia alta. Esto se logra aterrizando las estructuras metálicas. Pero la protección completa es con terminales de aire, conductores de bajada y electrodos de aterrizaje.

En el caso de edificios con estructuras metálicas, la multiplicidad de lazos conductivos cerrados dentro de la estructura actuarán para oponerse a la transmisión de pulsos de voltaje hacia el interior del edificio.
Las descargas directas viajarán por el anillo exterior de las columnas del edificio. Cualquier corriente que trate de entrar al edificio se bloqueará con las corrientes inducidas en las trayectorias cerradas.

La caída de voltaje inductivo asociada con esta coraza vertical de pulsos de corriente, está asociada con un campo magnético que enlaza la estructura total del edificio, e induce voltajes en otras partes del edificio, entre la parte superior e inferior de cada columna; aunque la parte superior del edificio estuviera a 250 kV, con respecto a tierra, casi ninguno de estos voltajes aparece como: "diferencia de potencial entre partes del edificio"

No hay problema para proteger contra pulsos de voltaje los equipos e instalaciones eléctricas interiores.

La protección de líneas de transmisión sigue el mismo patrón que la protección de edificios altos. Se trata de un cono lineal a ambos lados, con ángulos de 45º para estructuras importantes, hasta 30º para las menos importantes.

Estos ángulos no dependen de la altura con respecto a tierra. Pero para objetos de más de 75 pies (22.9 m) de altura resultan inadecuados.

Actualmente, estos objetos como torres de radio y televisión y algunos edificios altos están protegidos contra descargas arriba de ellos; pero, a veces reciben descargas de los lados.

Se ha encontrado que en vez de un cono lateral lineal de protección, es mejor una zona de lados curvos. Este concepto, desarrollado por Lee, se ha adoptado en las ediciones recientes del Código de Protección contra Rayos.

La zona de protección se define como una esfera con un radio de 150 pies tangente a la Tierra o cerca de objetos aterrizados y tocando algún miembro aterrizado de protección (arriba) o los terminales de aire de protección contra descargas.

Girando esta esfera horizontalmente, en los 360º , se define una superficie y el área debajo de esta superficie es la zona de protección.

La superficie de una zona de protección también se forma cuando tal esfera descansa en dos o más terminales de aire. Los objetos dentro de esta zona tienen 99.5% de protección contra descargas directas.

Se necesita analizar la zona de protección en todas las direcciones alrededor de la estructura que se quiere proteger, no sólo de un lado. Especialmente las esquinas necesitan protección, ya que se ha encontrado que son blanco favorito de los rayos.

3.3.3.2 PRACTICAS DE PROTECCION DIRECTA: fundamentalmente, la protección directa contra rayos (sistemas de protección contra rayos) consiste de terminales de aire o elementos desviadores que se colocan en la parte superior de la estructura que se quiere proteger y conectados a conductores de bajada adecuados, hasta unos electrodos de aterrizaje (a TIERRA).

Un terminal de aire se define como un componente del sistema de protección contra rayos cuya función es interceptar las descargas.

El principio fundamental es que los conductores de bajada no deben tener partes con resistencia o reactancia elevadas y deben ofrecer la impedancia más baja posible a TIERRA.

No debe tener curvas pronunciadas o lazos. Las estructuras metálicas, aterrizadas adecuadamente, cumplen este requisito si se les dota de terminales metálicos de aire, conectados a la estructura, para evitar la posibilidad de perforación que puede producir el golpe de descarga en el techo o a los lados. La estructura se debe aterrizar. Si no hay estructura de acero, es suficiente que el conductor de bajada tenga, por lo menos, dos trayectorias a tierra por cada golpe o descarga en los terminales de aire.

La superficie de contacto en las juntas del acero estructural del edificio, que esperamos que sean el paso a tierra, no se deben pintar con pintura no conductora de la electricidad. Si se usa pintura no conductora, las juntas se deben unir con conductores o se debe instalar conductores separados de bajada.

Los terminales de aire que se agregan a la estructura son barras sólidas puntiagudas o tubos de, por lo menos, 10 pulgadas (0.25 m) de longitud hasta unos 20 pies (6.1 m).

Estos terminales de aire se separan distancias determinada por el "radio crítico", de tal forma que la superficie de la estructura no sobresalga más allá de la superficie de protección.

El Código de Protección contra Rayos ANSI/NFPA 78-1989 tiene instrucciones detalladas para la colocación y espaciamiento de los terminales de aire en techos de edificios de varias configuraciones y sobre estructuras distintas a edificios techados.

En general, en el perímetro de edificios con techos planos o de poca pendiente, los terminales de 10 pulgadas (0.25 m) no se deben separar más de 20 pies (6.1 m) y los terminales de 2 pies (0.61 m) no se deben separar más de 25 pies (7.6 m).

En áreas techadas dentro del perímetro es suficiente un espaciamiento de 50 pies (15.2 m)

Los terminales de aire que exceden de 2 pies (0.61 m) de altura se deben soportar en un punto no menor que la mitad de su altura.

Todos los terminales de aire se deben conectar a conductores de bajada y deben tener, por lo menos, dos trayectorias desde cada terminal hacia los electrodos de aterrizaje (el voltaje se duplica en un circuito abierto o al final de los conductores de bajada).

El radio de curvatura debe ser tan grande como sea posible, no menos de 8 pies, ya que las curvas pronunciadas incrementan la reactancia del conductor. La reactancia es mucho más

importante que la resistencia porque el frente del pulso es de muy alta frecuencia.
Todas las estructuras deben tener dos trayectorias de bajada, por lo menos, excepto donde sólo se necesita una, como es el caso de mástiles, torres o astas.

La localización de los conductores de bajada dependerá de la localización de los terminales de aire, del tamaño de la estructura que se está protegiendo, de la ruta más directa, de la seguridad contra daños o desplazamientos, de la localización de cuerpos metálicos, tuberías de agua, de los electrodos de aterrizaje y de las condiciones de TIERRA.

Si la estructura tiene columnas metálicas continuas eléctricamente, éstas actúan como conductores de bajada. Los terminales de aire se deben interconectar con las columnas.

La distancia promedio entre los conductores de bajada no debe exceder de 100 pies (30 m).

Las estructuras con forma irregular pueden necesitar conductores extra de bajada.

Los conductores de bajada que atraviesan pasillos, calles, sitios de juego o caminos públicos, etc., se deben proteger contra daños o desplazamientos.

Si el conductor de bajada se canaliza en ducto metálico, el conductor se debe unir al ducto en ambos extremos.

Cada conductor de bajada se debe conectar, en su base, a un electrodo de aterrizaje o de tierra.

Este electrodo no se debe alejar más de 2 pies (0.61 m) de la base del edificio y se debe extender más allá de la fundación del edificio, si es posible.

La longitud del conductor de aterrizaje es sumamente importante.

Una extensión de 50 pies (15.2 m) hacia un electrodo mejor (como una tubería de agua), es menos efectiva que una conexión directa a un electrodo a la par del edificio.

Los electrodos deben hacer contacto con TIERRA debajo de la superficie para evitar el arqueo en la superficie.

Las conexiones a TIERRA se deben hacer a intervalos uniformes, alrededor de la estructura, evitando agrupar las conexiones en un sólo lado

Naturalmente que mientras mayor sea el número de conductores de bajada y de electrodos de aterrizaje, menor será el voltaje desarrollado en el sistema de protección y mejor será su comportamiento.

Esta es una de las grandes ventajas de los edificios con estructura de acero.

Tienen tantos conductores de bajada como columnas, o una cada 15 pies (4.57 m).

Además, al pie de cada columna se tiene la zapata, que es un electrodo muy efectivo, aún si no se interconectan los pernos de refuerzo y las barras.

Las partes metálicas interiores de un edificio sin estructura metálica, que se encuentren a menos de 6 pies (1.83 m) de los conductores de bajada, se deben conectar a esos conductores.

De otra forma, se pueden producir descargas laterales, debido a la caída de voltaje en la parte inferior del conductor de bajada y del electrodo.

Lo mismo ocurrirá cuando hay cercanía entre partes metálicas interiores y exteriores. Por ejemplo, las escaleras exteriores contra incendio.

En los edificios con techos planos y protegidos con terminales de aire, todas las partes metálicas y equipo que sobresalga a los terminales de aire, como los equipos de aire acondicionado, se deben unir al sistema de protección contra rayos.

Los metales con espesores menores de 3/16 de pulgada (4.76 mm), deberán tener un terminal de aire en su parte superior.

En los edificios y torres muy altas, se debe colocar una malla horizontal ecualizadora cada 60 pies (18 m). Esta malla se conecta a cada conductor de bajada para ecualizar la diferencia de potencial entre los conductores de bajada.

Si no se hace esto, cuando se produzca una descarga severa, debido a la diferencia de impedancia al pulso entre los conductores de bajada; tendremos gradientes de potencial sumamente elevados entre los conductores de bajada.

Estas mallas de ecualización se vuelven sumamente importantes si el área de la estructura es pequeña, ya que en este caso, tendremos pocos conductores de bajada para conducir la corriente total de descarga.

3.3.4 PRACTICAS PARA PROTECCION CONTRA RAYOS:

3.3.4.1 GENERALIDADES: los edificios y estructuras que involucran líquidos y gases peligrosos o explosivos demandan protección adicional.

La recomendación es que la corriente de descarga se debe alejar de la estructura, sin utilizar su parte metálica exterior o estructura, como conductor de bajada.

En casos como: tanques, graneros, fábricas y almacenes de explosivos, se usa un sistema de protección desviador separado.

El elemento derivador consiste de uno o más mástiles o uno o más alambres (entre mástiles o postes), que cumplan los requisitos de protección contra rayos.

Para estructuras que contienen líquidos y gases inflamables, el radio de la esfera de protección se reduce a 100 pies (30 m), en vez de 150 pies (45 m) que es la dimensión que

se usa normalmente.

Para prevenir las descargas laterales, la distancia mínima entre un mástil o alambre aéreo de tierra y la estructura que se quiere proteger no debe ser menor que la distancia de descarga lateral que describe el Código (Fig. 58).

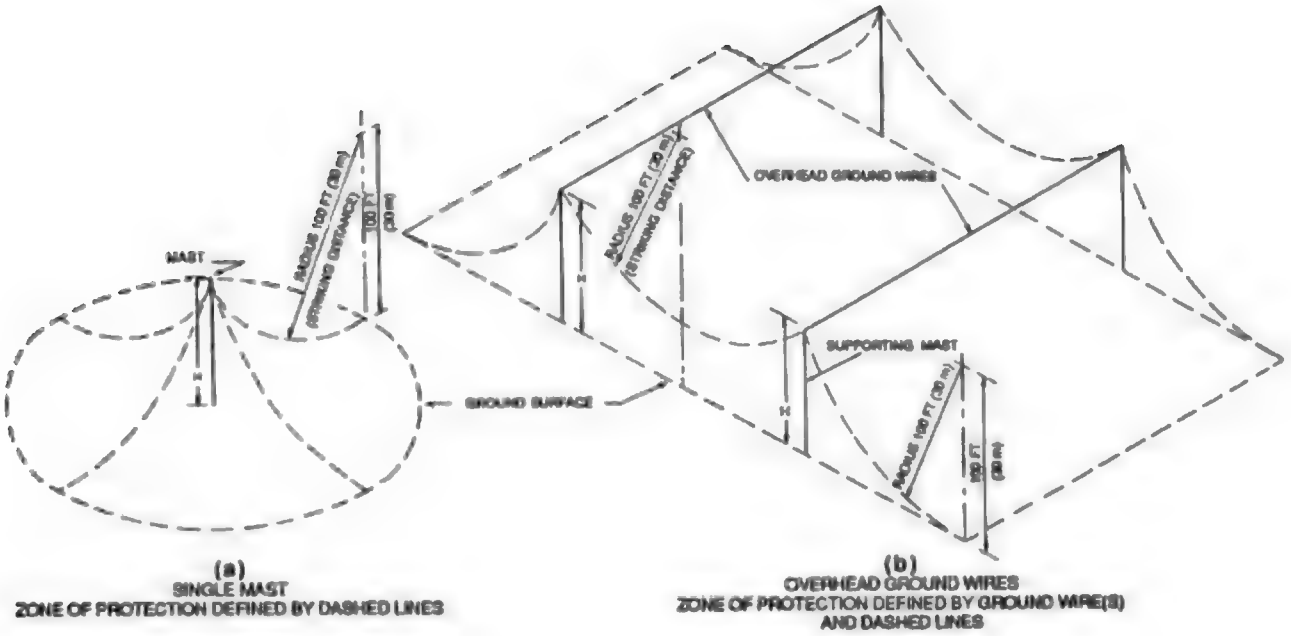


FIGURA 58 Protección contra descargas para estructuras que contienen materiales peligrosos

Los mástiles metálicos pueden trabajar como conductores de bajada. Los postes de madera deben tener un terminal de aire asegurado en la punta del poste y un conductor de cobre o "copperweld" a todo lo largo del poste, para que actúe como conductor de aterrizaje.

Los vientos de los tramos aéreos se pueden diseñar como conductores de aterrizaje. Como todos los conductores de aterrizaje, siempre se necesitan electrodos de TIERRA adecuados.

3.3.4.2 TANQUES Y SILOS: en algunos casos, no se considera necesario proteger los tanques que contienen líquidos o gases inflamables, siempre que la base del tanque se encuentre debidamente aterrizada. Se permiten las descargas directas, si las paredes son de acero, con un espesor mínimo de 3/16 de pulgada (4.76 mm), en este caso, el riesgo de una perforación es muy pequeño.

Se considera que los tanques de acero con techos de acero están autoprotegidos; pero los tanques con techos no metálicos se deben proteger con terminales de aire, mástiles conductores o alambres de tierra elevados.

En todos los casos, las uniones y las conexiones de tuberías deben ser eléctricamente continuas y se deben tapar todas las aberturas de vapores o gases o con techos a prueba de llama. Para prevenir una descarga directa en las cercanías de un escape o respiradero, se

debe tener cuidado con un terminal de aire de longitud apropiada.

3.3.4.3 CHIMENEAS NO CONDUCTORAS DE SERVICIO PESADO: incluyendo las de plantas de petróleo y químicas, los terminales de aire se conectan a un conductor en malla, alrededor de la parte superior de la chimenea y con dos conductores de bajada, por lo menos, hacia los electrodos de aterrizaje, en la base de la chimenea (Fig. 59).

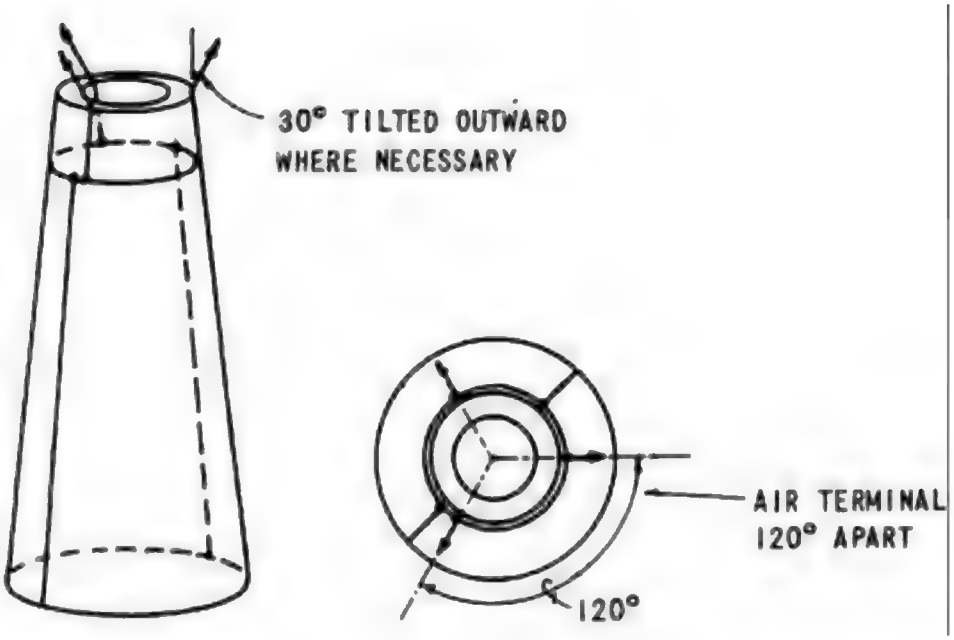


FIGURA 59 Protección contra descargas para chimeneas

Los terminales de aire se hacen de cobre sólido o de acero inoxidable y se deben distribuir uniformemente, alrededor de la parte superior de las chimeneas cilíndricas, a intervalos que no excedan de los 8 pies (2.44 m).

En las chimeneas cuadradas o rectangulares, los terminales de aire se deben colocar a menos de 2 pies (0.61 m) de las esquinas y no se deben separar más de 8 pies (2.44 m) a lo largo del perímetro.

Donde los gases de la chimenea no son inflamables, la longitud de los terminales puede ser de 18 pulgadas (0.46 m); pero en las que emiten gases explosivos o suciedad, la longitud debe ser, por lo menos, 5 pies (1.52 m).

Si es de tiro forzado, la longitud debe ser, por lo menos, 15 pies (4.57 m). En este último caso, los terminales de aire se inclinan a unos 30º de la vertical, hacia fuera.

Si los gases son corrosivos, los terminales de aire se deben recubrir con una capa de plomo de 1/16 de pulgada (1.6 mm). La malla se pone abajo de la parte superior de la chimenea.

3.3.4.4 CAMPANARIOS: son similares a las chimeneas, pero la diferencia es que siempre terminan en punta y, por lo tanto, sólo necesitan un terminal de aire. Sólo se tienen que elevar un poco para cumplir con los requisitos de protección contra rayos.

A veces se les deben poner varios terminales en función de la ornamentación que tengan. A veces se recubren con madera, no metálica, por lo que se puede necesitar conductores adecuados de bajada.

3.3.4.5 MASTILES ALTOS: los equipos cercanos a mástiles altos, como antenas de televisión y de FM, se pueden proteger de los daños de descargas directas, agregando puntas laterales o púas que se proyecten a los lados del mástil.

En alturas cercanas al radio crítico de 150 pies (45 m), las púas horizontales espaciadas convenientemente atraen las descargas sin que caigan en el propio mástil; esto reduce considerablemente la posibilidad de dañar los componentes eléctricos frágiles.

El número de púas alrededor del mástil (tres, cuatro, cinco o seis), su longitud y su espaciamiento vertical se deben determinar económicamente y de acuerdo con los principios de protección contra rayos.

Cuando los mástiles se colocan arriba de los edificios, la base de la estructura del mástil se debe conectar a la red de tierra del edificio en, por lo menos, dos puntos.

3.3.4.6 ESTACIONES Y SUBESTACIONES DE POTENCIA: la protección de líneas de transmisión es parte inherente de su diseño, no así en el caso de estaciones y subestaciones. Podemos aplicar la teoría del cono de 30 - 45º. Debemos protegerlas contra descargas directas, con zonas circulares de protección, con mástiles o cables de guarda; luego se conectan a la excelente red de tierra.

Se recomienda la protección con cable de guarda que se extienda por unos 2,000 pies (610 m) fuera de la estación; así, se evitará las descargas directas en esta parte de la línea y se reducirá la demanda sobre los pararrayos.

El espaciamiento desde los conductores de fase no debe ser menor que el nivel básico de aislamiento de impulso, del sistema de protección contra rayos. De otra forma, se producen descargas laterales. Se recomienda para líneas de 66 kV ó más, a menos que el nivel isoceráunico del lugar sea alto.

Los equipos se deben proteger con pararrayos, lo más cerca que se pueda de la estructura que se quiere proteger. La resistencia de la red de tierra no debe exceder de 5 ohmios, aunque en subestaciones mayores el valor debe ser más bajo.

El conductor de aterrizaje de los pararrayos se debe conectar a la barra común de tierra de la estación, este conductor de conexión debe ser lo más recto y corto que se pueda, no debe ser menor que el calibre AWG # 6 (4.11 mm), para circuitos de 1 kV y más; los calibres mayores son para resistir daños mecánicos y corrosión, etc.

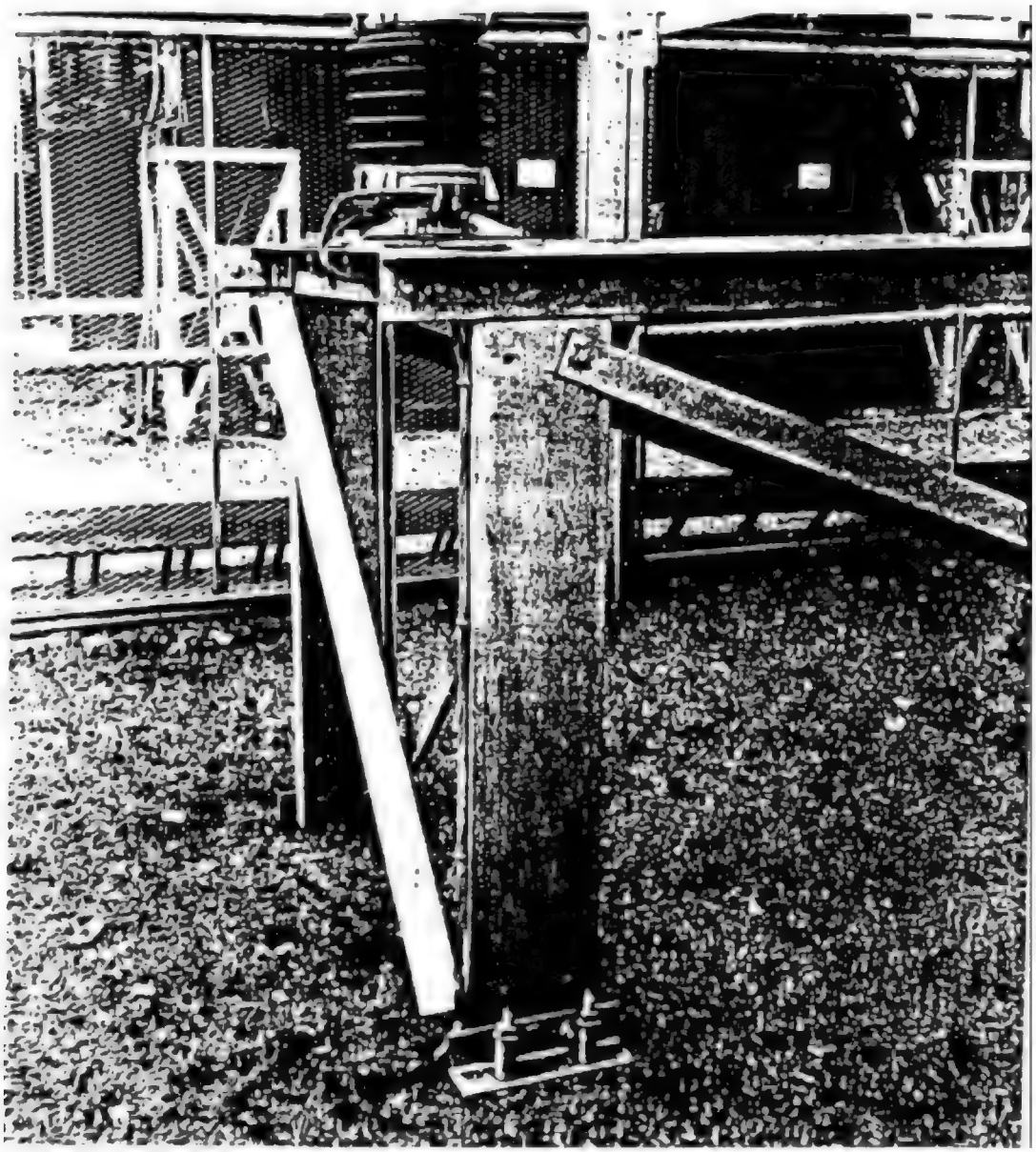


FIGURA 60 Método típico de aterrizaje de pararrayos

4.- CONEXION A TIERRA

4.1 RESISTENCIA A TIERRA

4.1.1 NATURALEZA DE LA RESISTENCIA DE ATERRIZAJE: la resistencia de aterrizaje de un electrodo se compone de:

(1) Resistencia del metal (electrodo)

(2) Resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo

(3) Resistencia del suelo, desde la superficie exterior del electrodo, siguiendo la geometría del flujo de corriente hacia fuera del electrodo hasta la TIERRA en el infinito

Los dos primeros valores son ó se pueden hacer pequeños con respecto al tercero (fracción de ohmio) y se pueden despreciar para fines prácticos, el tercer valor es el que discutiremos aquí.

Como la Tierra es (relativamente) infinita en tamaño, comparada con los sistemas de aterrizaje, según los conocemos, también lo es su capacidad para absorber fuentes ilimitadas de corriente.

Sin embargo, prácticamente, esta corriente ilimitada a tierra se transmite por la interfase electrodo metálico-suelo de la Tierra de la forma que describimos a continuación:

Alrededor de un electrodo de aterrizaje, la resistencia del suelo es la suma de las resistencias en serie, de conchas virtuales de TIERRA localizadas progresivamente hacia fuera de la barra.

La concha más cercana a la barra tiene el área circunferencial o sección transversal más pequeña, por lo tanto tiene la mayor resistencia.

Las siguientes conchas tienen progresivamente más área, es decir, progresivamente menos resistencia.

Cuando el radio desde la barra se incrementa, el incremento de resistencia por unidad de radio disminuye efectivamente casi a cero.

Para visualizar esto, la Fig. 61 nos ilustra un electrodo típico de tierra, en el suelo, y de 10 pies (3 m) por 5/8" (16 mm) de espesor.

La trayectoria de la corriente de tierra, hacia fuera de la superficie de la barra, es un conjunto de capas cilíndricas y hemisféricas sucesivas.

La sección transversal de cada capa se incrementa a medida que aumenta la distancia desde la barra. Su resistencia disminuye inversamente con el aumento de área.

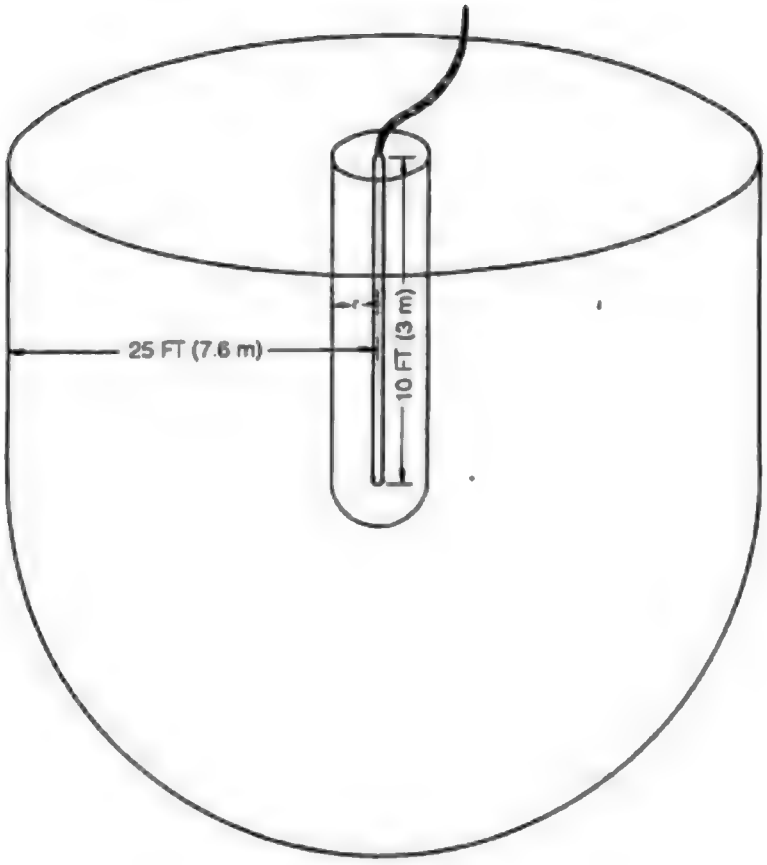


FIGURA 61 Desarrollo de la resistencia del electrodo

La sección transversal de cada capa se incrementa a medida que aumenta la distancia desde la barra. Su resistencia disminuye inversamente con el área.

La TABLA 9 muestra los resultados, considerando que a 25 pies (7.62 m), está el total de la resistencia de TIERRA.

La tabla indica que a 0.1 pie (0.03m) de la superficie de la barra se desarrolla el 25% de la resistencia total. Para los primeros 0.5 pies (0.15m) y 1 pie (0.3 m) tenemos, respectivamente, el 52% y el 68%.

TABLA 9 Resistencia del electrodo a un radio "r" pies desde una barra de 10 pies (3 m) de longitud por 5/8" (16 mm) de diámetro (Resistencia total a r = 25 pies (7.6 m) = 100%)		
Distancia "r" desde la superficie del electrodo (pies)	(m)	Porcentaje aproximado de la resistencia total %
0.1	0.03	25
0.2	0.06	38
0.3	0.09	46
0.5	0.15	52
1.0	0.30	68
5	1.5	86
10	3.0	94
15	4.6	97
20	6.1	99
25	7.6	100
(100)	(30.5)	(104)
(1000)	(305)	(117)

De eso concluimos que las primeras pulgadas desde el electrodo son las más importantes, en lo que concierne a la reducción de la resistencia del electrodo.

En lugares que tienen resistividades altas en el suelo, disminuir la resistividad del suelo en estas primeras pulgadas, como con tratamiento químico o usando concreto, será más útil para mejorar la efectividad del sistema de electrodos de aterrizaje.

Agregar más electrodos al primero, para reducir la resistencia, no afecta mucho la resistencia si están cerca del primero.

Muchos electrodos espaciados estrechamente no tienen una resistencia recíprocamente proporcional a su número.

La no-reciprocidad se debe a la resistencia mutua común en que la corriente de cada uno eleva el voltaje de los otros.

Como el voltaje es mayor para el mismo flujo de corriente, la resistencia aumenta por la resistencia mutua.

4.1.2 VALORES ACEPTABLES RECOMENDADOS: el sistema de aterrizaje mejor elaborado no se comportará satisfactoriamente, a menos que la conexión del sistema a TIERRA sea adecuada para la instalación en particular. Por lo tanto, la conexión a TIERRA es la parte más importante de todo el sistema y también es la más difícil para el diseño.

La conexión a TIERRA o el sistema de electrodos debe tener resistencia suficientemente baja, para permitir la operación pronta de los aparatos del circuito de protección, en la eventualidad de una falla a tierra y para dar la seguridad necesaria, contra choques, al personal que se pueda encontrar en las cercanías de las estructuras de equipos, conductores o los mismos electrodos y para limitar los sobrevoltajes transitorios.

ANSI/NFPA 70-190 (el NEC) por ejemplo, estipula que la Tierra o el bastidor de metal estructural de un edificio no se debería usar como el único conductor de aterrizaje de equipos y que se debe llevar, a cada uno de los servicios, el conductor aterrizado del sistema.

El desarrollo de electrodos de aterrizaje de resistencia baja es sumamente importante para satisfacer esas metas, especialmente para sistemas alimentados desde las compañías de distribución, en que la trayectoria de retorno de la falla es vía la tierra y en segunda instancia, como respaldo de las tierras de equipos que eventualmente pueden estar en circuito abierto sin intención.

Aún más, las instalaciones con niveles bajos de corriente de falla a tierra disponible no necesitan valores de resistencia de aterrizaje tan bajos, como en el caso de los sistemas grandes, con niveles de corriente de falla a tierra mayores.

Las resistencias de tierra de los sistemas, de menos de 1 ohmio, se pueden obtener usando un número de electrodos individuales conectados entre sí.

Una resistencia tan baja se puede necesitar sólo en las subestaciones grandes, líneas de transmisión o estaciones de generación. Las resistencias de 1 – 5 ohmios son apropiadas para subestaciones de plantas industriales y edificios con instalaciones comerciales grandes.

El valor de 25 ohmios que señala el NEC se refiere a la máxima resistencia por electrodo. Si la resistencia es mayor, se necesitará un segundo electrodo, lo cual no quiere decir que 25 ohmios sea un nivel satisfactorio para un sistema de aterrizaje.

En contraste, el Código Eléctrico Canadiense (CEC), CSA C 22.1-1990 usa un criterio de elevación máxima de la tierra de la estación de 5,000 voltios (o menos) bajo condiciones de máxima corriente de falla a tierra y de voltaje de toque que sean los valores estipulados en el CEC (básicamente esos valores son los mismos que se dan en el IEEE Std. 80-1986)

Antes de 1978, el CEC usó el criterio de que la resistencia de la tierra de la estación debía ser menor de 1 ohmio, lo cual es particularmente oneroso para subestaciones tipo industrial de capacidad pequeña.

El método estipulado por el CEC está basado en racionalidad sólida, el criterio está basado en la seguridad.
Sin embargo, sus deficiencias son evidentes en la interfase inspector-constructor, donde se

necesitan cálculos en vez de verificaciones sencillas (relativamente) de la resistencia a tierra.
4.1.3 RESISTIVIDAD DE LOS SUELOS: se necesita investigar la resistividad de la TIERRA en el lugar de la conexión. La resistividad de los suelos varía con la profundidad desde la superficie, con el tipo y concentración de los químicos solubles en el suelo, con el contenido de humedad y con la temperatura del suelo.

En otras palabras, la resistividad depende de los electrólitos en el suelo. La presencia de agua superficial no indica, necesariamente, resistividad baja.

En la TABLA 10 tenemos valores representativos de resistividad para diferentes tipos suelos.

Los efectos de la humedad y de la temperatura se presentan en las Tablas 11 y 12.

4.1.4 CALCULO DE LA RESISTENCIA A TIERRA: la resistencia a Tierra se puede calcular y se puede medir.

El cálculo se puede simplificar con las fórmulas desarrolladas y presentadas en la TABLA 13

Debemos establecer que esas fórmulas sólo son aproximaciones y dan el estado de las capacidades actuales con respecto a los modelos derivados por computador, de los sistemas de tierra y de los diseños de aterrizaje; se deberían examinar las consideraciones fuertes para usar esas herramientas

Una fórmula simplificada para los tipos de electrodo que se usan más ampliamente, exacta entre el 15% (resistencia desde una barra de 10 pies (3 m) de longitud y 5/8 de pulgada (16 mm) de diámetro, en tierra de resistividad uniforme de ρ Ω.cm es:

$$R_g \text{ (barra)} = [\ \rho\ (\Omega.\text{cm}) / (335\ \text{cm})\ ]\quad \Omega$$

Varios electrodos en paralelo reducen la resistencia a tierra de un sólo electrodo.

Para dar la resistencia baja a tierra, en instalaciones de capacidad alta, se usan varios electrodos.

Pero, sin embargo, el segundo electrodo no reduce la resistencia a tierra a la mitad, a menos que los dos se separen una distancia igual a varias veces la longitud del electrodo.

La regla útil es que en los sistemas de aterrizaje de 2 a 24 electrodos, si los colocamos separados una distancia igual a un electrodo, en línea, en triángulo, círculo o cuadrado vacíos, la resistencia de aterrizaje será la de un electrodo dividida entre el número de electrodos y multiplicada por el factor "F" de la Tabla 14.

Las consideraciones adicionales de potenciales de paso y toque se podrían determinar con la geometría,

Si colocamos los electrodos en el interior de la figura: cuadrado, círculo, etc., la resistencia

no se reducirá apreciablemente, en comparación a ponerlos en la periferia de la figura.

TABLA 10

RESISTIVIDAD DE SUELOS Y RESISTENCIA DE BARRAS SENCILLAS

Descripción del suelo	*Símbolo* del grupo*	*resistividad promedio* (Ω.cm)	*resistencia de una* barra de 5/8" x 10' (Ω)
cascajo o grava bien graduados, mezclas grava-arena, pequeña o sin refinar	GW	60,000-100,000	180-300
cascajo o grava poco graduados, mezclas grava-arena, pequeña o sin refinar	GP	100,000-250,000	300-750
cascajo o gravas arcillosos, cascajo o grava poco graduados mezclas arena-arcilla	GC	20,000-40,000	60-120
arenas cienosas o sedimentadas, mezclas poco graduadas, arenas-sedimentos	SM	10,000-50.000	30-150
arenas arcillosas, mezclas poco graduadas arena arcilla	SC	5,000-20,000	15-60
arenas finas de sedimentos o arcillas con plasticidad leve	ML	3,000-8,000	9-24
suelos fino arenosos o cienosos, sedimentos elásticos	MH	8,000-30,000	24-90
arcillas cascajosas, arcillas arenosas, arcillas cienosas o sedimentadas, arcillas pobres	CL	2,500-6,000**	17-18**
arcillas inorgánicas de plasticidad alta	CH	1,000-5,00**	3-16**

* La terminología que se usa en esas descripciones es de la Clasificación Unificada de

Suelos y es un método estándar para describir suelos en informes geotécnicos o geofísicos

** Los resultados de esas clases de resistividad de suelos están muy influenciados por la presencia de humedad

TABLA 11

EFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD SOBRE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

contenido de humedad (% en peso)	resistividad (Ω.cm)		
	suelo superior	barro arenosa	arcilla roja
2	?	185,000	?
4	?	60,000	?
6	135,000	38,000	?
8	90,000	28,000	?
10	60,000	22,000	?
12	35,000	17,000	180,000
14	25,000	14,000	55.000
16	20,000	12,000	20,000
18	15,000	10,000	14.000
20	12,000	9,000	10,000
22	10,000	8,000	9,000
24	10,000	7,000	8,000

TABLA 12

EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

temperatura ºC	resistividad (Ω.cm)
- 5	70,000
0	30,000
0	10,000
10	8,000
20	7,000
30	6,000
40	5,000
50	4,000

TABLA 13 FORMULAS PARA EL CALCULO DE LA RESISTENCIA A TIERRA

	Hemisphere radius a	$R = \frac{\rho}{2\pi a}$
	One ground rod length L, radius a	$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a} - 1\right)$
	Two ground rods $s > L$; spacing s	$R = \frac{\rho}{4\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a} - 1\right) + \frac{\rho}{4\pi s}\left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \cdots\right)$
	Two ground rods $s < L$; spacing s	$R = \frac{\rho}{4\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a} + \ln\frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \cdots\right)$
	Buried horizontal wire length $2L$, depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a} + \ln\frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \cdots\right)$
	Right-angle turn of wire length of arm L, depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L}\left(\ln\frac{2L}{a} + \ln\frac{2L}{s} - 0.2373 + 0.2146\frac{s}{L} + 0.1035\frac{s^2}{L^2} - 0.0424\frac{s^4}{L^4} \cdots\right)$
	Three-point star length of arm L, depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{6\pi L}\left(\ln\frac{2L}{a} + \ln\frac{2L}{s} + 1.071 - 0.209\frac{s}{L} + 0.238\frac{s^2}{L^2} - 0.054\frac{s^4}{L^4} \cdots\right)$
	Four-point star length of arm L, depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8\pi L}\left(\ln\frac{2L}{a} + \ln\frac{2L}{s} + 2.912 - 1.071\frac{s}{L} + 0.645\frac{s^2}{L^2} - 0.145\frac{s^4}{L^4} \cdots\right)$
	Six-point star length of arm L, depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{12\pi L}\left(\ln\frac{2L}{a} + \ln\frac{2L}{s} + 6.851 - 3.128\frac{s}{L} + 1.758\frac{s^2}{L^2} - 0.490\frac{s^4}{L^4} \cdots\right)$
	Eight-point star length of arm L, depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{16\pi L}\left(\ln\frac{2L}{a} + \ln\frac{2L}{s} + 10.96 - 5.51\frac{s}{L} + 3.26\frac{s^2}{L^2} - 1.17\frac{s^4}{L^4} \cdots\right)$
	Ring of wire diameter of ring D, diameter of wire d, depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D}\left(\ln\frac{8D}{d} + \ln\frac{4D}{s}\right)$
	Buried horizontal strip length $2L$, section a by b, depth $s/2$, $b < a/8$	$R = \frac{\rho}{4\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a} + \frac{a^2 - \pi ab}{2(a+b)^2} + \ln\frac{4L}{s} - 1 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \cdots\right)$
	Buried horizontal round plate radius a, depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s}\left(1 - \frac{7}{12}\frac{a^2}{s^2} + \frac{23}{40}\frac{a^4}{s^4} \cdots\right)$
	Buried vertical round plate radius a, depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s}\left(1 + \frac{7}{24}\frac{a^2}{s^2} + \frac{99}{320}\frac{a^4}{s^4} \cdots\right)$

Fórmulas aproximadas que incluyen el efecto de imagen. Las dimensiones deben estar en centímetros para que la resistencia resulte en ohmios.

ρ = *resistividad de la tierra en ohmios-centímetros.*

Para barras de 10 pies (3 m), de ½, 5/8 y 3/4" (12.7, 15.88 y 19.05 mm) de diámetro, la resistencia de aterrizaje se puede determinar aproximadamente dividiendo la resistividad del

suelo ρ [Ω-cm] entre 288, 298 y 307, respectivamente

TABLA 14	
FACTORES DE MULTIPLICACIÓN PARA VARIAS BARRAS	
# barras	F
2	1.16
3	1.29
4	1.36
8	1.68
12	1.80
16	1.92
20	2.00
24	2.16

4.1.5 CAPACIDAD DE CORRIENTE DE CARGA: este es un factor que no se debe descuidar en el diseño de un sistema de aterrizaje.

Las condiciones de temperatura y humedad en los alrededores inmediatos al electrodo tienen efecto directo sobre la resistividad de esta parte del circuito de aterrizaje.

Las corrientes que pasan desde el electrodo a tierra tendrán efectos definidos sobre esas dos condiciones.

Por lo tanto, la capacidad de corriente de carga de la conexión se debe analizar desde el punto de vista de la naturaleza del circuito de aterrizaje y de los tipos de carga que se espera que lleven en condiciones normales.

Las corrientes de magnitud baja, aunque sean de duración larga, producirán poco calentamiento, relativamente.

El efecto de la conducción del calor y el desplazamiento de la humedad por la acción capilar mantendrá, en muchos casos, la resistividad de la TIERRA, en las cercanías del electrodo, muy cerca del valor original.

Pero cuando la tierra tiene que disipar cantidades grandes de corriente, en períodos cortos, no se puede evacuar el calor por los procesos normales de conductividad térmica.

La densidad de corriente permisible, para un determinado incremento de temperatura, es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la resistividad del suelo.

Entonces, la resistencia efectiva de la conexión a TIERRA dependerá del número de tales

situaciones que pudieran ocurrir en sucesión, antes de restablecer las condiciones estables en la Tierra.

Ya que, aproximadamente, el 25% de la resistencia de aterrizaje de cada uno de los electrodos se da dentro de un radio de 0.1 pie (0.03 m) desde la superficie de la barra, durante las fallas graves se puede producir serios calentamientos y vaporización de la humedad adyacente a la barra.

Cuando la humedad sale por vaporización, la efectividad del electrodo en la TIERRA reseca se reduce sustancialmente y pueden aparecer arcos debajo de la superficie de la tierra.

La evaporación del agua del suelo produce señales de vaporización y ahumamiento en la superficie del suelo, en las cercanías del electrodo.

Para prevenir los electrodos ahumados no se debe exceder una corriente máxima por pie de longitud de la barra, para todo el sistema de barras, cuyos valores se determinan con la fórmula siguiente:

$$I = [\ (34{,}800)\ (\ d\ )\ (\ L\ )\ ]\ /\ [\ \ \rho\ t\ \ ]$$

Para una barra de 1 pie, 5/8 de pulgada, resulta 116 A en suelo de 2,500 Ω.cm y 58 A para suelo de 10,000 Ω.cm

En donde:
d = diámetro de la barra
L = longitud en metros
ρ = ohm.metro
t = segundos (válido sólo para tiempo corto)

Las corrientes a tierra de magnitud y duración altas no son comunes, pero podrían ocurrir como resultado de corrientes de falla a tierra que no se limpian prontamente.

Si las corrientes a tierra de este tipo se pueden pronosticar, el sistema se debe extender en un área relativamente grande y se debe ocupar suficiente número de electrodos para mantener la densidad de corriente, en la TIERRA, en un valor suficientemente bajo.

4.1.6 TRATAMIENTO DEL SUELO: la resistividad del suelo se puede reducir con tratamiento químico, en cualquier lugar, desde un 15 hasta en un 90% (dependiendo de la clase y textura del suelo).

Algunos productos químicos apropiados para este propósito son: cloruro de sodio, sulfato de magnesio, sulfato de cobre, cloruro de calcio, etc. Los que más se usan son: la sal común y el sulfato de magnesio.

Generalmente, los químicos se aplican colocándolos en trinchera circular alrededor de la barra, de tal forma que se evite el contacto directo con el electrodo.

Ya que el efecto del tratamiento no aparece durante un tiempo prudencial, se puede acelerar saturando el área con agua. Esto se puede hacer con un goteo de agua desde un ducto en el sitio de los electrodos.
Sin embargo, se debe entender y aclarar que este tratamiento no es permanente y que se debe renovar periódicamente, dependiendo de la naturaleza del tratamiento químico y de las características del suelo.

El tratamiento químico también tiene efectos adversos sobre la protección de corrosión de los electrodos de tierra, lo cual se debe determinar.

El tratamiento químico del suelo es una solución efectiva al problema de suelos de resistividad alta.

Para que sea efectivo se debe establecer un esquema de mantenimiento regular, para asegurar que se logra la resistencia de aterrizaje baja.

4.2 ELECTRODOS DE TIERRA

Básicamente, todos los electrodos se pueden dividir en dos grupos.

En el primero están los sistemas metálicos subterráneos de agua, estructuras metálicas de los edificios, cisternas metálicas, pilotes de acero y cualquier estructura metálica subterránea instalada para propósitos diferentes al aterrizaje.

En el segundo grupo están los electrodos que se diseñan y construyen específicamente con fines de aterrizaje.

Los electrodos fabricados se pueden subdividir en electrodos clavados, barras de acero de refuerzo en concreto debajo del suelo, tiras o cables enterrados, rejillas, placas enterradas y contrapesos. El tipo que se seleccione dependerá del tipo de suelo que se encuentre y de la profundidad disponible.

Las rejillas se usan en subestaciones o estaciones de generación para dar áreas equipotenciales a toda la estación, en lugares en que los peligros para la vida y propiedad podrían justificar su costo elevado. También es cierto que se necesita la menor cantidad de material enterrado para una resistencia de electrodo determinada.

Las placas enterradas casi ya no se usan por su costo alto en comparación con las barras o tiras. Aunque, cuando se usan en número pequeño, son el tipo menos eficiente de electrodo fabricado.

El contrapeso es una forma de electrodo de cable enterrado que se usa para anclar las torres de líneas de transmisión y estructuras.

Cuando se usan muchos electrodos, el espaciamiento de menos de 10 pies (3 m) puede ser que no dé el uso más económico de los materiales.
Al seleccionar el número y tamaño de los terminales de aterrizaje, se debe reconocer sus

limitaciones de descarga de corriente; si se excede, la tierra alrededor del electrodo puede explotar por la generación de vapor o se puede secar, hasta tal extremo de que llegue a ser no conductivo.

4.2.1 ELECTRODOS QUE EXISTEN: las estructuras metálicas de los edificios se amarran, con pernos de anclaje, a las zapatas de las fundaciones de concreto. Los pernos de anclaje, en el concreto, sirven como electrodos ya que la estructura metálica del edificio es simplemente un conductor de aterrizaje.

Para aterrizaje de seguridad y para sistemas pequeños de distribución, donde las corrientes a tierra son relativamente de magnitud baja, se prefieren esos electrodos porque son económicos en el costo inicial.

Sin embargo, antes de confiar en cualquier electrodo de este grupo, es esencial medir su resistencia a tierra para asegurar que alguna discontinuidad imprevista no afecte seriamente su funcionalidad.

También se debe asegurar cuidadosamente que todas las partes que se pudieran desconectar estén efectivamente unidas eléctricamente entre sí.

4.2.2 ELECTRODOS CLAVADOS: normalmente, son barras. Cuando las condiciones del suelo lo permiten, pocos electrodos enterrados dan mejores resultados que varios electrodos cortos, porque la resistividad del suelo disminuye con la profundidad, debido al incremento del contenido de humedad.

4.2.3 ELECTRODOS EMBEBIDOS EN CONCRETO: el concreto debajo del nivel del suelo es un medio semiconductor de una resistividad de 3,000 ohmios.cm a 20ºC ó un poco menos que la resistividad del suelo de barro promedio.

Consecuentemente, en la TIERRA con resistividad promedio o mayor, si embebemos en concreto los electrodos de barra o alambres, lograremos resistencias menores que con electrodos similares colocados directamente en la tierra.

Esto se debe a la reducción de la resistencia del material más cercano al electrodo primario, así como el tratamiento químico de la tierra reacciona cerca del electrodo.

Si se justifica excavar o perforar agujeros para colocar el concreto para rejillas de aterrizaje, el uso amplio de las barras de refuerzo de acero en las fundaciones de concreto y zapatas nos permite una fuente rápida de electrodos de aterrizaje.

En las estructuras que utilizan este tipo de construcción, sólo se necesita garantizar una conexión eléctrica adecuada desde la barra principal de refuerzo de cada fundación para agregársela a la barra de aterrizaje del edificio o acero estructural.

Las fundaciones pueden ser de dos tipos: zapata continua alrededor de la periferia del edificio (solera) o zapatas amplias de las columnas, que son miembros verticales unidos en la parte superior (sobre tierra) por las paredes.

Para este tipo de fundación podemos unir la armaduría vertical de las paredes con la armaduría horizontal de las fundaciones para tener una malla continua alrededor del edificio.

Después de cada una o alternativamente, en cada lugar de la segunda columna consecutiva, el armado vertical se puede unir o conectar con material similar (extensión del armado o similares) y fijarse a la columna.

De este modo, el uso de las barras estructurales existentes puede dar una tierra superior (en comparación con los entierros fuera de las zapatas de las fundaciones).

El otro tipo de fundación, la de columna o zapata, se puede usar de la misma forma pero sin los beneficios del alambre de tierra perimetral inferior.

En su lugar, se debe instalar un conductor de tierra perimetral superior (dentro de la pared o debajo del terreno).

Este conductor de tierra puede ser el armado o un conductor de tierra de cobre.

Cada uno de estos electrodos de fundación tiene una resistencia igual o menor que la de un electrodo clavado de igual espesor. El gran número de tales fundaciones inherentes a los edificios dará una resistencia neta a tierra considerablemente menor que la que podemos lograr con otro método de electrodos; generalmente es menos de i ohmio y frecuentemente en el orden de 0.25 ohmios.

Se pueden usar dos métodos para conectar el armado vertical con las columnas del edificio.

El primer método une el armado vertical con los pernos de anclaje; así, las columnas de acero se aterrizan por los pernos y tuercas.

El otro método necesita una trenza de cobre que penetra la parte superior de la pared y que se suelda o emperna al miembro de acero.

En ambos casos se debe tener cuidado al escoger el tamaño de la barra para la corriente de falla disponible y en el método en que se hacen las conexiones entre los elementos del armado.

Sólo son efectivas las zapatas de la periferia del edificio.

Para propósitos prácticos, la resistencia de aterrizaje neta (a la Tierra remota) no se bajará por “armar barras de tierra” en el área comprendida dentro de la periferia del edificio.

Sin embargo, se debe notar como precaución que la falta de unión entre los pernos de anclaje y armado puede ser responsable de:

fallas ocasionales en la estructura al pie de la torre por pasos de corriente a través del concreto intermedio, en condiciones de falla severa

el debilitamiento por resequedad del concreto intermedio, por el flujo de corrientes de dispersión, como en las plantas de celdas químicas (C.D.)

Para asegurarnos que las corrientes de falla a tierra de magnitudes altas no reventarán explosivamente el concreto por el secado rápido de la humedad en el concreto alrededor del armado, el tamaño de las barras escogidas para esta utilización es crítico.

La corriente por pie de barra se resume en la TABLA 15

TABLA 15			
CAPACIDAD DE CORRIENTE DE ARMADURIA DE CONSTRUCCION			
DIAMETRO DE LA BARRA		AMPERIOS/PIE	
		TIEMPO DE LIMPIEZA	TIEMPO DE LIMPIEZA
PULGADAS	# BARRA	5 CICLOS	1 SEGUNDO□
½	4	112	32
5/8	5	135	39
¾	6	157	46
1	8	200	58
1 *3/8*	11	270	78

Se ha encontrado que las barras de acero en concreto, en excavaciones (irregulares) en suelos rocosos o muy rocosos son mucho mejores que cualquier otro tipo de electrodo fabricado.

Este tipo de electrodo da aterrizaje adicional para la mayoría de torres de acero de líneas de transmisión de voltaje alto.

4.2.4 OTROS ELECTRODOS: cuando la roca firme está cerca de la superficie o cuando se encuentra arena, el suelo es apto para ser muy seco y de resistividad alta y se necesita tener una conexión a tierra extensa.

En esas condiciones, las tiras de metal, alambres o cables enterrados ofrecen la solución más económica.

Como la efectividad de este tipo de electrodos de descarga de rayos es función de su inductancia, se prefiere usar unas tiras cortas bien espaciadas en paralelo, en vez de una o más tiras largas.

La profundidad a la que se entierran las tiras puede no ser crítica.

Sin embargo, como indica la TABLA 12, la temperatura (y por lo tanto la profundidad) puede tener un efecto en áreas donde la temperatura del suelo pueda bajar del punto de congelación.

Pruebas del National Bureau of Standards muestran que la resistencia decrece sólo 5% cuando la profundidad se incrementa de 18 pulgadas a 36 pulgadas (0.5 a 1 m) para resistividad uniforme del suelo.

De la misma forma, el efecto del tamaño del conductor es extremadamente pequeño.

La práctica preferida con electrodos de placa es enterrarlos de canto, porque se necesita menos excavación y es posible obtener mejor contacto con el suelo cuando se rellena. Parece que la diferencia entre la resistencia efectiva de placas horizontales y verticales es poca.

Para las placas que se usan más comúnmente, de 10-20 (09-1.9 m^2), la profundidad óptima de entierro es 5-8 pies (1.52-2.4 m).
4.2.5 ATERRIZAJE DE SUBESTACIONES: en las subestaciones eléctricas grandes, la corriente de falla a tierra es generalmente alta y la probabilidad de personas allí podría también ser alta.

Los problemas de esto son: peligros de choque alto al tocar partes metálicas aterrizadas mientras se está parado sobre la tierra, caminando sobre la tierra de la estación o caminado fuera de la subestación en contacto de la cerca o valla.

El IEEE Std 80-1986 (ANSI) describe ampliamente este problema y suministra datos de diseño para tales sistemas de aterrizaje. Las características básicas y los elementos de diseño para sistemas de rejillas amplias están en esa norma.

La roca triturada toscamente (por ejemplo granito), se riega normalmente sobre toda la superficie del suelo dentro del área de la rejilla de la subestación, no por razones de ornamentación, sino que para darle tratamiento de superficie de resistencia alta para reducir el peligro de potenciales escalonados a las personas dentro del área durante una falla severa.

La roca de granito (granito pórfido), aún cuando se humedece con la lluvia, tiene una resistencia de aislamiento alta [4.5 (10^5) Ω.cm húmeda, 1.3 (10^8) Ω.cm seca].

Es razonable que si no se puede usar roca triturada de buena calidad, cuando la localización de la subestación pueda ser interna, se necesiten otros medios para incrementar la seguridad al personal.

Se puede usar asfalto por su resistividad alta cuando está húmedo (> $1_1$000,000 Ω.cm)

4.2.6 POTENCIALES DE TIERRA TRANSFERIDOS: se refiere al fenómeno del potencial de la tierra de un lugar (o voltaje referido al potencial de tierra) que aparece en otro lugar donde hay un potencial de tierra contrastante.

La elevación del potencial de tierra de una subestación puede estar en el orden de algunos 5,000 voltios, y se puede transferir a un lugar no fallado por medio de un conductor de tierra (o ducto metálico, rieles, etc.) que salga de la subestación. Esta situación se debe evitar para asegurarle protección, tanto al personal como al equipo en el extremo no fallado.

Las etapas para aliviar estos problemas de potenciales transferidos incluyen la unión de rejillas de tierra (que están en un rango de separación de 100 – 300 pies) y el uso de transformadores de aislamiento.

Este problema lo reconocieron las distribuidoras con la aplicación de protección de alambre piloto donde los conductores de voltaje bajo (circuito de alambre piloto) estuvieran interconectando dos rejillas remotas de tierra.

Muchas de las técnicas de mejoramiento se basaron en la solución de las distribuidoras a este problema.

Las Juntas de Aislamiento en Rieles y Ductos se pueden usar para limitar el transporte de potenciales transferidos.

4.3 METODOS Y TECNICAS DE CONSTRUCCION

4.3.1 SELECCION DE LAS BARRAS: se construyen en diámetros de: 3/8, ½ 5/8, 3/4 y 1 pulgadas (9.53, 12.7, 15.88, 19.05 y 25.4 mm); y en longitudes desde 5 hasta 40 pies (1.5 a 12.2 m)

Para muchas aplicaciones, los diámetros de ½ 5/8 y 3/4 de pulgada (12.7, 15.88 y 19.05 mm) son satisfactorios.

El NEC establece que las varillas de hierro o acero deben ser, por lo menos, de 5/8 de pulgada (15.88 mm) de diámetro y que los de material no férreo no deben ser menores de ½ pulgada (12.7 mm) de diámetro.

El acero revestido de cobre, uno de los tipos más comunes de barra, permite clavar a profundidades considerables sin dañar la barra, en tanto que el recubrimiento de cobre permite la conexión directa cobre-cobre, entre el conductor de aterrizaje y la barra.

Además del acero revestido de cobre, se dispone de barras de acero galvanizado y de acero inoxidable.

Las de acero inoxidable se deben analizar con las condiciones del suelo para garantía contra la posibilidad de ruptura de resistencia a la corrosión.

Algunas barra se consiguen en secciones para facilitar su penetración. Cada sección se empuja hasta el nivel del suelo, se agrega otra sección usando un acoplamiento (roscado, manguito de compresión o soldado) para hacer un conductor continuo.

Con un perno removible o cabeza especial de perforación que soporte los golpes de empuje se evita el daño de la rosca al extremo de la barra.

Por razones de seguridad, las barras se deben empujar hasta que ninguna parte desprotegida quede sobre el terreno.

El efecto del diámetro de la barra sobre la resistencia de la conexión a tierra es pequeño. El diámetro sólo se determina por la rigidez mecánica que se necesita para la penetración.

Tiene sus ventajas seleccionar el diámetro de barra más pequeño que cumpla con los requisitos de penetración.

Las condiciones promedio de suelo permitirán el uso barras de ½pulgada (12.7 mm)

La barra de 5/8 de pulgada(15.88 mm) se puede enterrar en casi todos los tipos de suelo.

Y la barra de ¾ de pulgada (19.05 mm) se puede reservar para condiciones excepcionalmente duras o para barras profundas.

Para condiciones ordinarias del suelo, las barras de 10 pies (3 m) de longitud cumplen con el requisito del Código que recomienda enterrar, por lo menos, 8 pies (2.44 m).

4.3.2 METODOS PARA ENTERRAR LAS BARRAS: la penetración necesita mínimo equipo de perforación pero puede demandar mucho tiempo por pie de barra.

Una modificación al proceso de penetración consiste de un mandril y martillo deslizante, permite que se trabaje a un nivel conveniente para el operario, sin escaleras o plataformas auxiliares.

Una ventaja adicional es que el golpe se da en la barra en un punto no lejano del nivel del suelo, lo cual permite que las barras se metan a profundidades mayores que las que se podría con penetración manual.

Si las barras se enterraran en gran escala comparativamente, sería bueno tener equipo motriz de perforación.

Hay martillos eléctricos, neumáticos y a gasolina; los dos primeros necesitan fuente de potencia.

Cualquiera que sea el tipo de herramienta de penetración que se use, se debe tomar las precauciones para prevenir la deformación de la cabeza.

4.3.3 CONEXIÓN A ELECTRODOS: usualmente se hace por uno de varios medios.

El primero de esos métodos involucra el uso de herrajes mecánicos, que están disponibles fácilmente, instalación sencilla y desconectables para medir la resistencia a tierra y tienen una historia larga de uso satisfactorio.

Aunque algunas veces, la corrosión ha presentado algún problema, el tratamiento de la junta como una conexión eléctrica ordinaria en un ambiente corrosivo elimina muchos de los problemas en este aspecto.

Las conexiones mecánicas deberán estar, cuando menos en todas las posibilidades, accesibles para inspección o servicio.

El segundo método, un proceso exotérmico o tipo soldadura de conexión al electrodo ha incrementado su uso en los años recientes, por el ahorro en tiempo y costos cuando se deben hacer muchas conexiones.

Este método da una conexión permanente, elimina la resistencia de contacto y está libre de corrosión, relativamente.

También permite usar cable de cobre más pequeño (comparando conexión exotérmica vrs, herraje mecánico) por su límite máximo de temperatura de 1,083º C, comparado con el máximo de 250º C – 350º C que usualmente se permite en algunas conexiones mecánicas (sin embargo, el Artículo 250-94 del NEC impone un límite de tamaño mínimo de conductor).

Sin embargo, este método tiene ciertas limitaciones inherentes. Necesita un medio separado de desconexión, como juntas empernadas sobre el terreno, para medir la resistencia a tierra.

También se necesita cierto entrenamiento y no se puede usar en presencia de mezclas volátiles o explosivas, o donde los productos gaseosos de la operación pudieran interferir con las operaciones en las cercanías.
Las conexiones en tiempo borrascoso pueden ser difíciles si no se da suficiente protección.

El tercer método aceptado ampliamente, conexiones por compresión, son de fácil instalación, dan resistencia baja de contacto y reducen la posibilidad de conexiones pobres. Sin embargo, esos conectadores no se pueden desconectar para medir la resistencia a tierra.

Otros métodos de juntas, como soldaduras de latón, son satisfactorias si se hacen apropiadamente.

4.3.4 UNION A SISTEMAS SUBTERRANEOS DE AGUA: esto presenta varios problemas.

Los herrajes tipo abrazadera son relativamente costosos, ya que deben acoplar un ducto grande con un conductor pequeño.

La soldadura puede provocar esfuerzos localizados que pueden perjudicar la función del ducto, especialmente si contienen fluidos a presión alta.

En donde se considere necesaria la conexión, la soldadura es aceptable técnicamente y preferible si lo permiten los códigos locales de tuberías.

Si se conectan las tierras antes de que el esfuerzo se desarrolle (y se sigue un programa), debería compensar cualquier esfuerzo local provocado por la conexión de aterrizaje.

Una dificultad adicional podría ser el desarrollo de corrosión si se dan las condiciones electroquímicas.

4.3.5 UNION AL ACERO ESTRUCTURAL: los herrajes empernados son más apropiados para el acero estructural que se puede perforar pero no se puede soldar.

Están disponibles en formas y tamaños para acomodar un rango de conductores.

El material de la abrazadera o el acabado protector que se aplica a la abrazadera se debe escoger para que sea satisfactorio para el alambre de aterrizaje y el acero o hierro desde el punto de vista de la corrosión.

También se usa la soldadura y los procesos exotérmicos para conectar al acero estructural, pero se deben restringir a las aplicaciones que no afectarán las propiedades estructurales del acero.

4.3.6 PREPARACION DE LA JUNTA: es importante que la superficie de cualquier conexión se limpie de cualquier medio aislante como: aislamientos, grasas, pinturas, suciedad o corrosión, antes de hacer la conexión.

4.4 MEDICION DE LA RESISTENCIA A TIERRA

4.4.1 NECESIDAD DE LA MEDICION: muchos factores indeterminados existen en cualquier fórmula para el cálculo de la resistencia a tierra.

No se debería poner confianza total en los resultados calculados.

Por ejemplo, la resistividad del suelo varía inversamente con la temperatura del suelo y directamente con el contenido de humedad y puede variar con la profundidad.

La única forma certera de determinar la resistencia es medirla después de completar el sistema.

Un refinamiento deseable es medir la resistencia de cada uno de los electrodos durante la instalación.

4.4.2 METODOS DE MEDICION: los principios que se usan en la medición de la resistencia a tierra son esencialmente los mismos que se usan para medir otros tipos de resistencia eléctrica.

Todos los diversos métodos disponibles usan dos electrodos auxiliares, además del que sometemos a prueba y los podemos situar en una de las tres clases generales siguientes:

(1) El método de los tres puntos: en que la resistencia a tierra del electrodo sometido a prueba y de los electrodos auxiliares se van midiendo dos electrodos a la vez, en serie. Este método es apropiado para medir la resistencia a tierra de electrodos de tierra aislados (separados) o instalaciones pequeñas de aterrizaje.

(2) El método de caída de potencial: que involucra pasar una corriente alterna conocida por el electrodo sometido a prueba y uno de los electrodos auxiliares y medir la caída de potencial entre esos electrodos y el segundo electrodo auxiliar situado a varias distancias entre los dos electrodos fijos. Este método puede estar expuesto a errores considerables

si están presentes las corrientes extraviadas de tierra (stray currents), a la misma frecuencia del Medidor Probador; o si están enterrados ductos u otros conductores cerca del electrodo en prueba.

(3) El método de relación: que involucra medir la relación de la resistencia a tierra de un electrodo auxiliar de prueba a la resistencia a tierra en serie del electrodo sometido a prueba y el segundo electrodo auxiliar. Al multiplicar esta relación por la resistencia serie nos resulta la resistencia efectiva de los electrodos de tierra. Este método es más satisfactorio que los métodos de triangulación, ya que las relaciones de los electrodos auxiliares de prueba a la resistencia del electrodo sometido a prueba pueden ser tan altas como de 300:1

Los instrumentos portátiles de prueba disponibles comercialmente dan el medio más conveniente y satisfactorio para medir la resistencia de aislamiento; pero, sin embargo, no son apropiados porque no pueden medir valores de resistencia suficientemente bajos.

Asimismo, los medidores ordinarios de resistencias bajas carecen de suficiente voltaje para separar la resistencia de aterrizaje que necesitan los electrodos auxiliares para hacer la prueba.

La precisión en la medición de la resistencia a tierra difícilmente se logra y usualmente no se necesita.
Normalmente, es suficiente una exactitud de orden del 25%, en vista de las muchas variables.

Al medir la resistencia de un sistema completo, es deseable dejar que transcurra algún tiempo, antes de hacer las mediciones, para que la tierra alrededor de los electrodos se consolide.

Esto no se aplica a los electrodos auxiliares necesarios en la prueba, ya que su resistencia se anula en el período de prueba.

4.4.3 PRUEBAS PERIODICAS: las pruebas se deberían hacer periódicamente después de la instalación y prueba original, así se puede determinar si la resistencia permanece constante o se está incrementando.

Si la última prueba muestra que la resistencia está incrementando a un valor indeseable, se deben tomar acciones para reducir la resistencia, ya sea reconstruyendo las conexiones corroídas, agregando electrodos, incrementando el contenido de humedad o por tratamiento químico.

4.4.4 MEDICION DE LA RESISTIVIDAD DE LA TIERRA: los instrumentos portátiles comerciales disponibles para medir la resistencia del electrodo de aterrizaje normalmente se pueden usar bien para medir la resistividad del suelo.

Para este fin se conectan a cuatro electrodos espaciados uniformemente en línea.

El espaciamiento entre los dos electrodos del centro es una medida directa de la profundidad efectiva que se desea para la resistividad; es decir, por ejemplo, un espaciamiento de 10 pies (3 m) da la resistividad promedio del suelo de los 10 pies (3 m) de arriba, y así sucesivamente.

Este método de prueba se conoce como el Método Wenner de 4 pines y es casi el más popular de los métodos de determinación de la resistividad de tierra.

El instrumento da una lectura óhmica, que, multiplicada por dos veces el espaciamiento en centímetros y multiplicada por π es la resistividad del suelo en π.cm

Las instrucciones completas para esta prueba vienen con cada instrumento.

4.4.5 ATERRIZAJE ELECTRICO Y CORROSION: el objetivo básico de un sistema de aterrizaje eléctrico sólido es seguridad del personal, confiabilidad de la operación del equipo, retorno de las corrientes de falla y limitar los sobrevoltajes transitorios.

Después que se han satisfecho esos objetivos, se debe considerar el efecto de la instalación de aterrizaje sobre la corrosión.

Los sistemas, los equipos y los rayos contribuyen incógnitamente, algunas veces, a la corrosión de los conductores subterráneos, de las estructuras y de las tuberías. El problema es corrosión galvánica. Este tipo de corrosión se debe a metales distintos conectados eléctricamente y que forman una celda galvánica.

Con esas condiciones, los cinco factores siguientes determinan la relación de corrosión:

(a) La diferencia de potencial de los dos metales

(b) La relación de las áreas expuestas de los dos metales

(c) La resistencia del electrolito

(d) La resistencia del circuito externo

(e) Las corrientes extraviadas (stray currents) entre los electrodos, conductores, estructuras y tubos

El cobre, el metal que se usa generalmente para aterrizaje, es un metal noble y puede tener efectos corrosivos serios en estructuras subterráneas hechas de hierro o acero que están conectadas eléctricamente al cobre.

Esas estructuras comprenden tuberías subterráneas, ductos, acero de edificios, tanques enterrados y cables enterrados recubiertos de plomo.

La FIG. 62 ilustra la celda galvánica que resulta cuando el acero y el cobre están conectados eléctricamente.

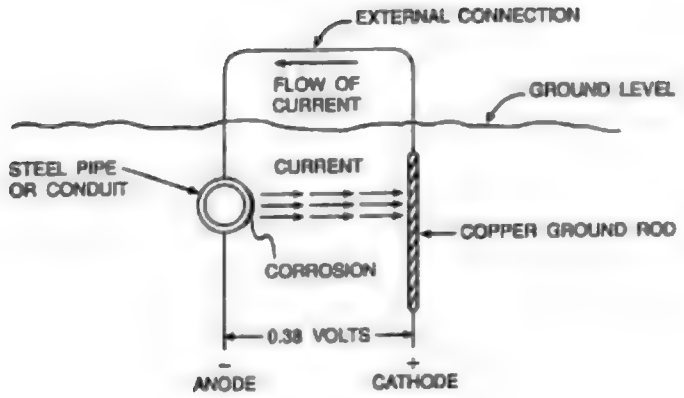


FIGURA 62 Celda Galvánica de metales distintos

El acero puede ser una tubería o ducto, el cobre una barra de tierra y la conexión externa podría ser a través del acero de soporte de la tubería o a través de una barra de tierra conectada directamente al ducto.

La posición relativa del acero (hierro) y el cobre en la serie electromotriz, TABLA 16, produce un potencial de 0.38 voltios y de acuerdo a la Ley de Ohm, fluye una corriente, por el suelo (electrolito) que completa el circuito.

TABLA 16

SERIE ELECTROMOTRIZ DE METALES

METAL	POTENCIAL	
Bario	2.90	EXTREMO BASE o
Calcio	2.87	EXTREMO ANODICO
Sodio	2.71	
Magnesio	2.40	
Aluminio	**1.70**	
Zinc	0.76	
Níquel	0.23	
Plomo	0.12	
Hierro	0.04	
Hidrógeno	0.00	
Bismuto	**- 0.23**	
Cobre	- 0.34	
Plata	- 0.80	

Mercurio	- 0.80	
Oro	- 1.50	EXTREMO NOBLE o
		EXTREMO CATODICO

Donde la corriente sale del acero (ánodo) y entra al suelo es que tendremos nuestro disturbio llamado corrosión.

Una corriente de 1 amperio C.D. pasando durante 1 año corroerá 20 libras de acero, 22 libras de cobre, 75 libras de plomo o 25 libras de zinc.

Entonces, vemos esa cantidad de corriente asociada con la corrosión, a mayor corriente, se corroerá más metal.

La diferencia de potencial entre los dos metales influirá la cantidad de corriente que pasará entre ellos. A mayor potencial, mayor corriente y mayor será la velocidad de corrosión.

La resistencia de la tierra (electrolito) limitará el flujo de corriente.

Ya que la corriente total depende de la diferencia de potencial entre los dos metales y de la resistencia entre ellos, la intensidad de la corriente del ánodo es función de la relación del área, la intensidad de corriente es pequeña.
Este es uno de los principios básicos en ingeniería de corrosión y se usa como un factor de control en el diseño.

No se debe instalar un ánodo pequeño y un cátodo grande.

En este caso, la corriente total se confina en un espacio pequeño y la densidad de corriente es grande.

Un ejemplo de esto sería una tubería subterránea subiendo y sobre un soporte de tubo aterrizado.

La junta resultante cobre-acero empeora cuando el tubo tiene baño o capa de pintura, ya que ninguna es 100% efectiva.

Pueden aparecer pequeños agujeros o pinchazos en el baño o capa, exponiendo el acero.

Entonces, la corriente se concentra en esos pinchazos provocando fugas que ocurren en un tiempo muy corto.

La serie electromotriz no presenta todos los hechos sobre corrosión, presenta sólo sus tendencias iniciales.

La relación real de corrosión está determinada por la corriente, pero la serie electromotriz determina qué metal se desgastará y cuál permanecerá sin cambios.

Los metales con valores positivos de la TABLA 16 están en el extremo base o anódico de la serie, esos metales se corroerán.

Los metales con valores negativos están en el extremo noble o catódico, esos metales estarán protegidos.

Por eso el nombre de Protección Catódica.

Cuando un metal es el cátodo, está protegido y no se corroerá.

La resistencia del electrolito o suelo es uno de los factores más importantes que afecta el flujo de corriente asociado con la corrosión galvánica.

Por la Ley de Ohm vemos que a menor resistencia del electrolito mayor será la corriente de corrosión.

Consecuentemente, para menor resistividad del suelo, mayor será la corrosión galvánica.

Usando material distinto al cobre para aterrizaje, la junta galvánica cobre-acero se puede eliminar.

Si este metal estuviera cerca del hierro en la serie galvánica, habría un potencial pequeño, la junta galvánica sería menor.

El metal debería tener conductividad eléctrica buena, la que debe tener una tierra, ya que una tierra debe ofrecer impedancia baja a la corriente de falla y a los rayos.

Notemos que la armaduría de acero (y similares), cuando se embebe en concreto, tiene aproximadamente el mismo potencial que el cobre y así no se corroerá.

Para barras de tierra se usa el acero (al carbón e inoxidable) y se recomienda el zinc.

El acero necesita protección catódica, como la varilla de acero se puede enmohecer, se usan barras de acero inoxidable que son más costosas.

Las barras de acero galvanizado no se deberían usar en los aterrizajes porque el zinc se corroerá y expondrá el acero desnudo que se enmohecerá.

En su lugar, podríamos usar un ánodo de zinc, que consiste de un núcleo pequeño de acero embebido en zinc.

Están disponibles en varios tamaños, pero el más apropiado para una barra de tierra lo ha diseñado el American Zinc Institute como AZI-2-30 y AZI-4-60

El primer número es el área de la sección transversal en pulgadas cuadradas y el segundo número es el peso en libras. Cada uno tiene una longitud de 5 pies.

Las parejas metálicas, óxidos y películas electrolíticas se pueden ver también como juntas de rectificación básicas que conducen a la electrólisis y migración del metal en un sistema de

C.A., si están presentes las corrientes extraviadas o capacitivas.

El término protección catódica incluye también ánodos consumibles; por ejemplo: Zinc, Magnesio y rectificadores de bajo-voltaje o paneles de drenaje que soslayan el metal protegido.

La protección activa en la forma de sistema de corriente aplicada de C.D. se puede instalar, también, para proteger de los efectos de la corrosión cualquier metal susceptible en la tierra.

El problema de corrosión es de importancia considerable en sistemas de C.D., tales como sistemas de minas o tránsito con rieles negativos, donde se practica el control de corrientes extraviadas y aterrizaje y se pueden dar juntas accesibles de mitigación a las estructuras.

5 - ATERRIZAJE DE EQUIPO ELECTRONICO SENSIBLE

5.1 INTRODUCCION

El aterrizaje del equipo electrónico sensible, tales como computadoras, controladores lógicos programables, plantas de proceso, sistemas de control distribuido y equipo electrónico similar es uno de los aspectos más importantes para lograr una operación aceptable y útil.

El término "computadoras" se usará no sólo para las computadoras sino que también para todos los equipos electrónicos sensibles. Los voltajes de operación bajos en las computadoras y otros equipos electrónicos sensibles los hacen susceptibles a voltajes aleatorios de niveles más bajos que no son perceptibles para los humanos y que no tienen efectos eléctricos sobre los equipos de potencia.

Por ejemplo, el equipo electrónico sensible es extremadamente sensitivo a los voltajes de carga estática que generan los humanos en un movimiento simple del cuerpo. Efectivamente, los voltajes que las descargas eléctricas inyectan en la tierra, aún a distancias de varios miles de pies, a menos que se tenga una neutralización apropiada, pueden provocar funcionamiento anormal y posiblemente dañar el equipo.

Se ha aprendido mucho, no en como prevenir esta fuente de interferencias, sino que en prevenir que entren en los sistemas de los equipos electrónicos sensibles. Con los medios disponibles en la actualidad, se puede eliminar el funcionamiento anormal y el peligro de los voltajes transferidos a tierra.

5.2 DEFINICIONES

computadora. Se refiere, en sentido genérico, a todos los equipos electrónicos sensibles

electrodo. (Ver capítulo 4)

Observe que contrario a la noción popular, el NEC no sugiere el uso de varillas de aterrizaje. La Sección 250-81 establece que si están disponible los elementos siguientes, se deben usar en ese orden y luego se deben unir entre ellos para formar el sistema de electrodos de aterrizaje.

(1) Tubería metálica subterránea de agua
(2) Estructura metálica del edificio, que esté aterrizada efectivamente
(3) Electrodo embebido en concreto
(4) Anillo de aterrizaje

La Sección 250-83 establece que si la lista anterior no es accesible, entonces y sólo entonces se puede usar cualquiera de los siguientes:

(1) Otros sistemas o estructuras subterráneas metálicas locales
(2) Electrodos de barras y tubos
(3) Electrodos de placa

Uno de los sistemas de electrodos de aterrizaje más efectivos es un anillo de aterrizaje unido al acero del edificio a intervalos apropiados. Los electrodos embebidos en concreto conectados al acero del edificio, y con el acero del edificio aterrizado efectivamente, no sólo es un sistema de electrodos de aterrizaje efectivo, sino que también es eficiente en costos.

neutro. El punto donde el potencial es igual, en amplitud, desde cualquier otro conductor. El término neutro también se refiere al "Conductor Identificado" del NEC. Puede haber ocasiones que nos referimos o se usa el término similar en: una fuente de potencia monofásica de dos hilos; conexión delta trifásica con derivación en el centro de un lado; o un sistema aterrizado en una esquina de una delta. En estos casos, el término "neutro" se referirá al conductor que se conecta intencionalmente a tierra.

tierra ruidosa. Es lo opuesto a tierra quieta. Una tierra ruidosa es una conexión eléctrica a un punto de tierra que produce o inyecta voltajes espurios en el sistema del computador a través de la conexión a tierra.

tierra quieta. Este término se usa en muchas instalaciones de computadoras y manuales de instrucción, artículos y otros documentos. El IEEE Std 100-1988 (ANSI) define "tierra quieta" en términos de instalaciones de cuidados de salud. Es "un sistema de conductores de aterrizaje, aislados de las partes de aterrizaje convencional de los sistemas de potencia, que interconectan los puntos de tierra de los aparatos eléctricos con el propósito de dar inmunidad al ruido electromagnético"

Cuando se usa con respecto a sistemas de computadoras, el término "tierra quieta" generalmente es vago e indefinido en los manuales de computadoras.

Para nuestro uso, nos referiremos a un punto en un sistema de tierra que no inyecta voltajes espurios dentro del sistema de computadoras.

No hay normas para medir cuán quieta es una tierra quieta. Realmente es un sistema que no inyecta tales voltajes, ya sea un aterrizaje del tipo electrodo, como también un electrodo aislado de aterrizaje.

No hay aislamiento real entre los electrodos. La tierra tiene resistencia por lo que se debe considerar como un elemento eléctrico (resistencia, inductancia o impedancia) en un circuito eléctrico. Siempre hay una corriente que fluye en la tierra, la cual produce una diferencia de potencial entre los electrodos, hasta uno pocos pies de distancia. No sólo están estas diferencias, sino que también varían de segundo en segundo, especialmente durante tormentas eléctricas.

referencia cero. Generalmente se entiende que es tierra (masa) o el planeta Tierra (cuando nos referimos al planeta escribiremos Tierra con mayúscula). Desafortunadamente, Tierra puede estar a potencial distinto de cero. Este error conceptual, probablemente procede desde los días de la radio, cuando los aparatos de tubos al vacío usaron el chasís metálico como el punto eléctrico común como retorno por tierra en el circuito.

Se usó el símbolo de tierra para un lado de cada uno de los circuitos de filamentos de los tubos. Además, probablemente, algunas rejillas de control usaron el símbolo de "tierra", en el circuito.

En el chasís de tubos al vacío, la superficie metálica puede servir como superficie equipotencial, debido a que los voltajes que se usan son altos.

Desafortunadamente, la Tierra no es una superficie equipotencial y no se debe considerar como un punto de referencia cero, sino que como un punto en un circuito eléctrico que contiene diferentes potenciales, dependiendo de dónde se hace la conexión sobre la Tierra.

Algunos consideran la Tierra como sumidero infinito de potencia eléctrica, capaz de absorber cualquier cantidad de potencia eléctrica.

Nuevamente, Tierra se debe considerar como parte de un circuito eléctrico, en los casos que conciernen a corriente continua. Con rayos ó descargas eléctricas ó estática, hay un circuito.

5.3 HISTORIA DEL ATERRIZAJE DE COMPUTADORAS

5.3.1 SATISFACCION DE REQUISITOS DEL CODIGO. Las computadoras se aterrizaron por la necesidad de seguridad y por cumplir requisitos del NEC.

Primero se aterrizaron en el sistema de aterrizaje de los equipos de potencia eléctrica de los edificios en que se encontraban las computadoras. El conductor de tierra del equipo fue un alambre verde aislado o alambre desnudo. En muchos casos, el ducto metálico sirvió para este propósito. La tierra del equipo se conectó a la entrada de servicio del edificio, al conductor neutro que procede de la compañía de distribución. El gabinete metálico se unió con conexión al neutro, al conductor de aterrizaje del equipo y a Tierra.

La toma de tierra podría ser una barra y/o tubería metálica de agua. El acero del edificio también se conectó en el sistema de aterrizaje del edificio, intencional o no-intencionalmente.

No había requisitos particulares sobre qué partes de tierra del sistema de potencia y de tierra de las computadoras se deberían conectar; entonces, las conexiones se hacían generalmente en el conductor de tierra en el toma, receptáculo o tablero que suministraba potencia al computador.

Esto satisfacía requisitos del NEC para que nadie pudiese recibir golpes por tocar el gabinete del computador, en condiciones de falla de fase a tierra.

A medida que los componentes de las computadoras fueron más complejos y sensibles a los voltajes bajos, se encontró que los transitorios de los voltajes podrían ser peligrosos y dañinos para los dispositivos de estado sólido.

Los transitorios eléctricos de voltaje entraban a las conexiones múltiples, desde el conductor neutro al sistema de tierra.

En un edificio comercial, no es raro encontrar el conductor neutro conectado a tierra o Tierra en el transformador.

En cada uno de los servicios eléctricos, de cada edificio que se sirve desde ese transformador, el neutro se podría conectar a tierra.

No es raro encontrar la barra del neutro de los tableros de aparatos y receptáculos, conectada al gabinete metálico del tablero, lo cual viola el NEC.

En un estudio se encontró que un 20% de los conductores neutro tenían fallas accidentales a tierra, en circuitos que alimentaban luminarias fijas.

Con conexiones múltiples del sistema de tierra, al que estaban conectadas las computadoras, el flujo de corriente transfería voltajes en el sistema de aterrizaje de las computadoras, provocando errores o daños peores.

La Fig. 63 ilustra una de las condiciones. El término "tierra quieta" se originó cuando se comenzaron a usar las tierras aisladas, alrededor de 1960.

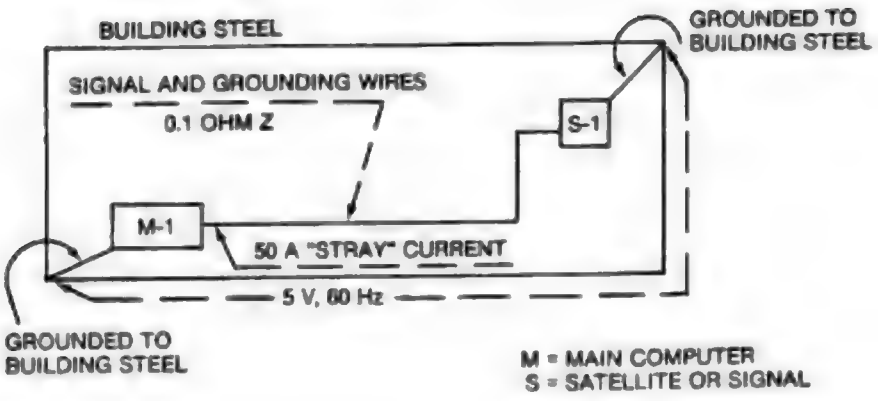


FIGURA 63 Voltaje entre trayectorias conductivas múltiples de corriente a tierra en el acero del edificio

El término "tierra ruidosa" se aplicó a las tierras de los sistemas de potencia eléctrica, donde se hacían conexiones múltiples a tierra sobre ellas, como se ve en la Fig. 64.

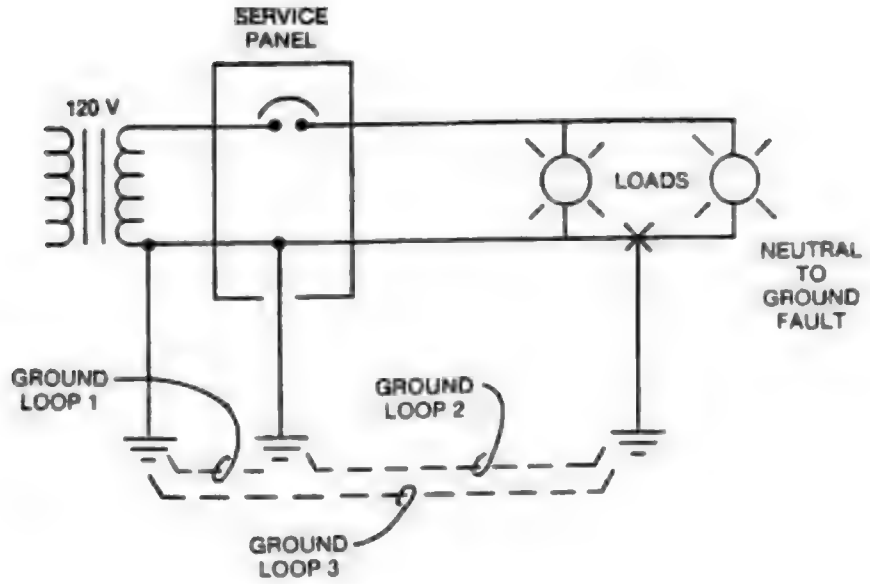


FIGURA 64 Trayectorias de corriente en varios neutros a tierra

5.3.2 RUIDO EN TIERRA DEL SISTEMA DE POTENCIA. Con el incremento de complejidad de los sistemas de computadoras, se necesitó tener computadoras satélites o terminales remotas, colocadas lejos del lugar de la computadora principal. Los sitios de las computadoras remotas tenían fuentes de potencia. Se podían alimentar desde el sistema de potencia de la computadora principal, pero muchas veces se prefirió alimentarlas desde otra parte del edificio.

En los sistemas de aterrizaje de un edificio, no es raro tener diferencias de voltaje medibles entre punto y punto, debido al flujo de corriente, ya sea de 60 HZ o transitorios de alta frecuencia.

Entonces, la conexión a la tierra del sistema de potencia en el sitio remoto podría conectar la tierra remota con algunos pocos voltios de diferencia con la tierra del computador principal. Esto podría inyectar dentro del sistema, la diferencia de potencial entre las dos conexiones a tierra, interfiriendo con las señales normales del computador.

Con trayectorias múltiples a tierra y conductor neutro conectado intencional o no-intencionalmente, al sistema de tierra en muchos puntos, la corriente de retorno por el neutro podría fluir sin control sobre el sistema de tierra.

En cada uno de los puntos donde el neutro se conecta a tierra y que existen trayectorias en paralelo, la corriente se dividirá, por la Ley de Ohm, de acuerdo al inverso de la impedancia del circuito (Ver Fig. 64)

Por este flujo de corriente sin control sobre el sistema de aterrizaje, el sistema de potencia se conoció como "tierra sucia o ruidosa". El personal de computadoras resolvió no meterse

nunca más con los sistemas de aterrizaje de los edificios.

5.4 SISTEMA O EQUIPOS QUE SE DEBEN ATERRIZAR

5.4.1 SISTEMAS DE POTENCIA: en los sistemas eléctricos de potencia, hay por lo menos dos grupos o clases de aterrizaje:

(1) *Aterrizaje del Sistema.* Es el aterrizaje de alguna parte de la fuente del sistema de potencia eléctrica, generalmente el sistema del neutro

(2) *Aterrizaje de equipo.* Es el aterrizaje de todas las estructuras y gabinetes metálicos de los equipos, uniendo todas las partes y conectando esta unión a tierra.

5.4.2 EQUIPO ELECTRONICO SENSIBLE (COMPUTADORAS): así como la fuente del sistema eléctrico de potencia, las computadoras tienen diversos sistemas que se deben aterrizar:

(1) *Aterrizaje de Señal Común.* La señal común también se conoce como "Señal Común de CD". El sistema de referencia cero para líneas de datos y en general, la parte de señales, representan el neutro sensible de las computadoras. Este es uno de los sistemas que son sensibles a los transitorios de voltaje y necesitan un punto de referencia estable, con respecto a un potencial de voltaje.

(2) *Barra de Tierra de Referencia de la Fuente de Potencia de CD.* La computadora puede tener varios sistemas de voltaje de CD diferentes, tales como + 12 / 0 / -12 V, + 24 / - 24 V

(3) *Barra de Tierra del Equipo.* Este es el gabinete metálico o estructura del equipo de la computadora. Puede incluir el chasís de los elementos del computador, así como también el mueble o gabinete exterior. Algunos fabricantes de computadoras se refieren a la barra de tierra del equipo como la "Barra Segura de Tierra" (Safety Ground Bus)

Además de los términos que hemos descrito para los diferentes sistemas de barras de aterrizaje, podemos encontrar esos términos como: Tierra Segura de CA (AC Safety (mains) Ground), Tierra de Referencia de Computadoras (Computer Reference Ground), Señal Común de CD (DC Signal Common), Tierra Común (Earth Common), Barra de Tierra de CD (DC Ground Bus), Punto Maestro de Tierra de CD (DC Master Ground Point) y Punto Común de Tierra de Fuente de Potencia (Power Supply Common Ground Point).

Pareciera que cada compañía de computadoras ha generado sus propios términos para las diferentes partes aterrizadas de sus sistemas. No hay uniformidad en la terminología, aunque, como veremos más adelante, todas ellas deben terminar conectándose juntas.

5.5 TIERRAS DE COMPUTADORAS

5.5.1 CONEXION DE PUNTO SIMPLE O SENCILLO: para prevenir las corrientes continuas desviadas o corrientes circulantes que puedan afectar las señales o la operación de las computadoras, se necesita mantener el sistema de tierra del computador separado de la tierra de los componentes del equipo y conectados todos juntos en un único punto. Actualmente, es conveniente que el sistema de tierra del computador se mantenga completamente aislado del sistema de tierra del equipo del sistema eléctrico de potencia, excepto cuando los dos sistemas de tierra se conectan juntos en un único punto (Ver Fig. 65)

Los fabricantes de computadoras pueden tener varios sistemas de tierra diferentes. Se pueden referir a ellos como: tierra de potencia, tierra de señales, tierra de seguridad, etc. Con excepción de la tierra de seguridad, que generalmente es el gabinete del equipo y que se debe aterrizar según el Art. 250 del NEC, todas las otras tierras terminarán en un único punto. Lo que nos interesa es lo que se debe hacer con este punto de tierra.

El punto único donde los dos sistemas de aterrizaje, el sistema de tierra de potencia eléctrica y el sistema de aterrizaje del computador, se pueden conectar juntos está en uno de dos lugares. La Fig. 71 ilustra el punto común para el aterrizaje del sistema de potencia eléctrica. Los dos sistemas de aterrizaje se pueden conectar en este punto común de tierra, que entonces debería ser el terminal de aterrizaje para este montaje. O el sistema de aterrizaje del computador se puede conectar al acero del edificio aterrizado efectivamente que se encuentre más cerca.

Cuando un montaje maestro de sistema de computadoras se compone de varios gabinetes, las conexiones internas de las tierras, no la tierra del gabinete, se deben llevar a un sólo punto, dentro de los gabinetes y este punto se debe conectar a tierra.

La conexión de las tierras individuales debería ser en forma de sistema de distribución radial o un "árbol", sin ninguna trayectoria a tierra en paralelo.

La conexión interna de la tierra de señales debería ser al gabinete, en vez de que quede aislada del gabinete, entonces, todos los gabinetes de los componentes necesitan estar aislados de tierra o del piso conductivo sobre el cual puede descansar. La unión de tierra de señal/gabinete se debe conectar al acero del edificio aterrizado efectivamente que se encuentre más cerca.

Si los sistemas de tierra computador/señal separados están aislados del gabinete y se llevan juntos hasta este punto común, no se necesita aislar, el gabinete del computador, del piso aterrizado o conductivo o de cualquier otro piso.

Las instrucciones de instalación de un fabricante de computadoras indicaban "conduit" plástico aislado para el acoplamiento. El acoplamiento con "conduit" aislado es una violación del NEC. Además, el sistema de enfriamiento o de calentamiento probablemente dañen el aislamiento y eliminen el efecto de aislamiento que el fabricante está tratando de lograr.

Para rechazar la inducción de frecuencias muy altas, el conductor de conexión del computador a la rejilla de tierra, en el piso o a un piso de computador del tipo aterrizado, se

debe mantener lo más corto posible.
5.5.2 TIERRAS DE RESPALDO: a veces, en una instalación eléctrica, se desea hacer mediciones de la resistencia de los electrodos de aterrizaje. Para ello se debe aplicar un voltaje entre el electrodo de aterrizaje y uno o más electrodos externos provisionales. El procedimiento de medición de la resistencia fácilmente podría inyectar sobrevoltajes en cualquier sistema de computadoras, especialmente si el sistema del computador tiene líneas de señales que entran a la instalación, desde el exterior. Para esta medición, es conveniente tener un medio de desconexión entre el terminal de tierra del computador y el electrodo de aterrizaje del sistema de potencia y además, contar con un electrodo separado, temporal y exterior a la instalación.

Esta tierra de referencia temporal debe estar afuera o lejos de la influencia del electrodo principal de aterrizaje en que la conexión de tierra de la computadora se conecta normalmente. Estas dos operaciones sólo se hacen durante el tiempo que se necesita para hacer la medición del electrodo de aterrizaje.

El electrodo de prueba puede quedar conectado al terminal de tierra del computador, aún después de la prueba, asegurándonos que la conexión original de tierra está en paralelo, ya que entonces quedaría sólo como un ramal sencillo del sistema de aterrizaje de la instalación.

5.5.3 CONDUCTORES AISLADOS DE ATERRIZAJE: el NEC reconoce que los equipos sensibles, tales como: cajas registradoras, minicomputadores, impresoras, etc. se pueden afectar adversamente con las corrientes que fluyen en los conductores comunes de aterrizaje de los equipos, como conduit, conductor o barra verde, acero de edificios, etc.

Para reducir tales problemas, el NEC en la Sección 250-74, Excepción No. 4, permite que se lleve un conductor de aterrizaje aislado, desde el terminal del aterrizaje aislado del receptáculo hasta el punto de aterrizaje del servicio de potencia eléctrica o al terminal aterrizado del sistema derivado separado para servicios de los receptáculos, este conductor se debe llevar en el ducto, canaleta o conduit, con los conductores que sirven la carga del receptáculo.

Generalmente es un conductor verde con una banda amarilla. Este conductor no se debe conectar en cualquier barra de aterrizaje o punto común entre la carga del receptáculo y el lugar de aterrizaje básico. Este sistema elimina mucho del ruido que afecta a tales equipos. Sin embargo, los problemas surgieron por interpretación errónea de la Sección 250-74, Excepción No. 4 y otras instalaciones inapropiadas.

El uso de cualquier conductor de aterrizaje aislado y un receptáculo aterrizado aislado no sustituye el requisito para las partes metálicas de la caja del receptáculo, canaletas, ductos, conduit, etc. que se deben conectar al sistema de tierra del equipo del edificio (Vea Fig. 65).

Entonces, se necesitarán los siguientes conductores:

(1) Conductor de Fase (generalmente negro)
(2) Conductor Identificado (neutro, blanco)

(3) Conductor de Tierra del Equipo del Sistema (verde)
(4) Conductor de Tierra del Equipo Aislado (generalmente verde con banda amarilla)

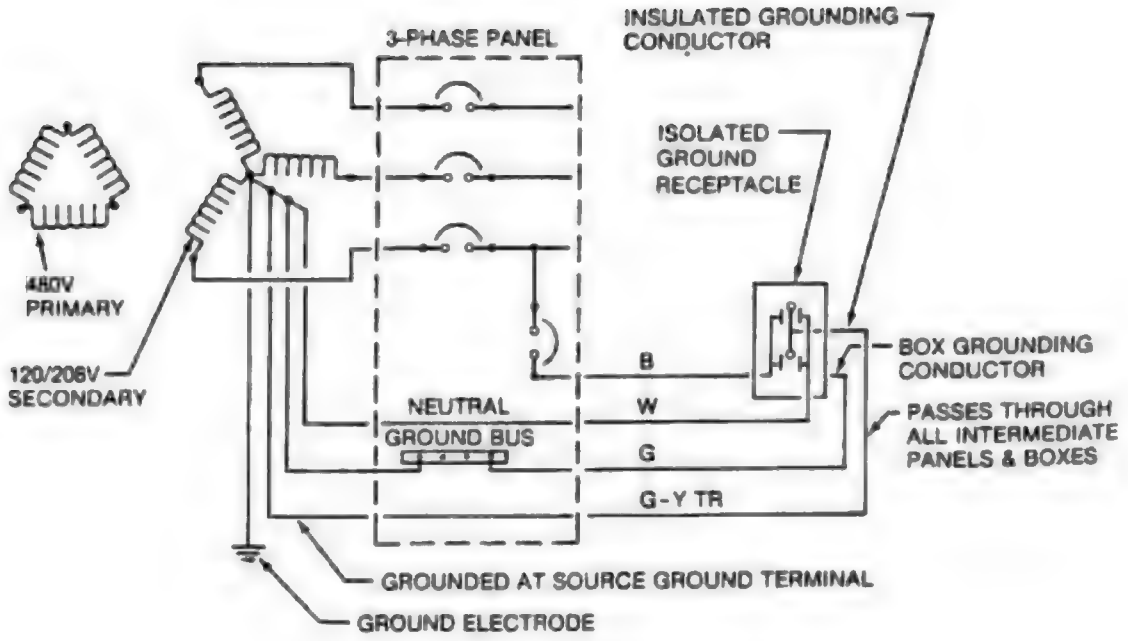


FIGURA 65 Conductor de aterrizaje aislado para tomacorrientes de equipo sensible, según NEC Sección 250-74, excepción Nº 4

No se recomienda confiar en el metal de los ductos. La prueba de Harold Kaufmann sobre la forma en que fluyen las corrientes durante una falla en un cable de potencia No. 4/0 AWG y más grandes concluye que un conductor interno de aterrizaje mejora la eficiencia del retorno por tierra. Para conductores No. 12 AWG hasta No. 6 AWG, Robert West demostró que el efecto de incremento de la impedancia no es un factor.

Los conductores internos de retorno para tierra mejoran la confianza, especialmente si se involucra aterrizaje de equipo electrónico sensible. La Fig. 65 ilustra la circuitería y la trayectoria del conductor aislado de aterrizaje, a través de tableros intermedios en la ruta, hasta el punto en donde se aterriza el sistema.

Cuando hay un número grande de estos conductores aislados, es lógico conectarlos todos juntos en una barra de aterrizaje sensible, en el gabinete más cercano al electrodo de aterrizaje y llevar un conductor grande al terminal principal de aterrizaje.

5.5.4 TIERRAS SEPARADAS / AISLADAS:

5.5.4.1 DESCRIPCION: Ya que se encontró que el sistema de aterrizaje de potencia está sucio, la solución lógica es no usar el sistema de aterrizaje del equipo de potencia eléctrica del edificio, para aterrizar las computadoras.

Posiblemente, a los fabricantes les faltó comprender la función y operación del aterrizaje del neutro y del sistema de tierra, y les llevó a los siguientes requisitos erróneos de instalación, de los fabricantes, para el equipo electrónico sensible.

La alternativa que se escogió fue aterrizar las computadoras a un electrodo aislado de aterrizaje de una ó varias barras, separadas del sistema de electrodos de aterrizaje del sistema eléctrico de potencia. Esto tomó la forma de una a diez barras, separadas del edificio, unos pocos pies. Este esquema podría tener una resistencia de 10 a 30 Ω ó más.

Esta resistencia adicional, generalmente encubre el problema eléctrico con el sistema de las computadoras por agregar esa impedancia adicional en el circuito.

La efectividad de varias barras, de 10 pies (3.05 metros) de longitud, separadas 10 pies, se disminuye, ya que la distancia más efectiva entre las barras es la suma de las profundidades de las barras. (Vea Capítulo 4.1).

Esta separación eléctrica de los electrodos de aterrizaje sin unir todos los electrodos de aterrizaje no cumplió con los requisitos del NEC. La Fig. 66 ilustra este sistema.

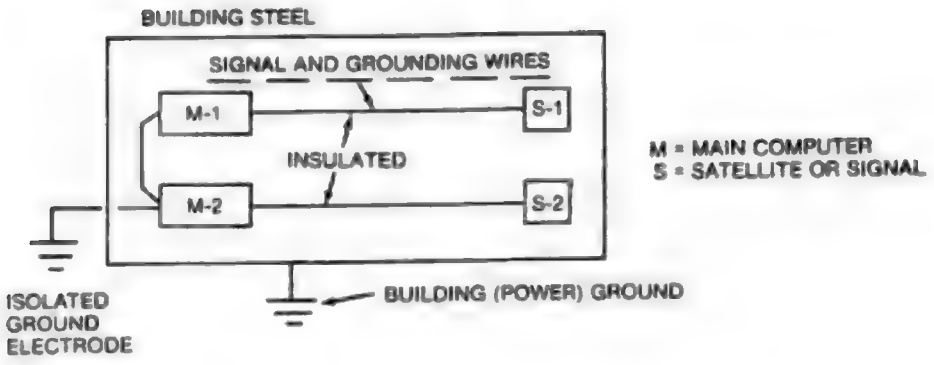


FIGURA 66 Aterrizajes aislados de computadoras

En algunos casos, en vez de barras de 10 pies de longitud, se conectaron varias varillas de 20, 30 ó más pies. La longitud que se usó dependió del área disponible, del diseñador y/o del constructor.

5.5.4.2 AISLAMIENTO DEL RUIDO: el sistema aislado de tierra reduce el ruido que proviene del sistema de tierra de potencia por las varias conexiones de aterrizaje. Efectivamente, esto se llama "tierra quieta". Como se inyecta una impedancia adicional en el circuito, se recogerá algo de ruido, a menos que todas las computadoras interconectadas se aterrizaran en el mismo grupo de electrodos. Puede existir voltaje en Tierra entre los electrodos separados unos cuantos pies; estos voltajes se podrían introducir en las diferentes partes del sistema de

computadores conectados en electrodos de aterrizaje separados.
5.5.4.3 PROBLEMAS: como el ruido continuo de nivel bajo se eliminó con la práctica de tierra aislada, se encontró un número catastrófico de incidentes. El análisis indicó que la separación de tierras fue responsable de voltajes muy grandes que se le aplicaron a los componentes del computador en condiciones de descargas eléctricas (rayos). Estos voltajes aparecieron estuvieran conectadas o no, las computadoras. Claramente, se necesitaron algunos cambios.

Los voltajes grandes se debían a los rayos que caían en el edificio o en el sistema de potencia que servía al edificio. Hubo otras causas que no fueron tan evidentes. Cuando las nubes cargadas se posaban encima, se inducían cargas en el edificio, sobre las tierras debajo de ellas. Por la resistencia del electrodo de aterrizaje del edificio, el voltaje del edificio se elevó a niveles sustanciales, sobre el de las computadoras. Mientras las computadoras permanecían al voltaje del electrodo aislado separado.

Esta diferencia en voltajes y la capacitancia entre las computadoras y la estructura del edificio, indujo voltajes en los componentes del computador que estaban por arriba del voltaje de ruptura de los componentes. Muchos componentes semiconductores de las computadoras soportarán sólo 20 V ó menos por un tiempo corto como 1 μs. Esta condición se ilustra en la Fig. 67.

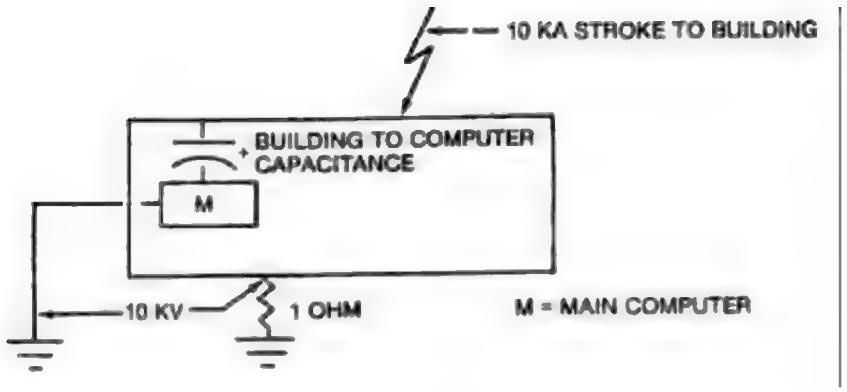


FIGURA 67 Efectos de una descarga sobre un edificio con electrodo de aterrizaje aislado (No se recomienda)

Los voltajes pequeños de interferencia inyectados en la circuitería de la computadora por los voltajes inducidos del edificio, debido a las cargas concentradas en las nubes sobrepuestas, aún sin que ocurran descargas, pueden provocar problemas similares.

Estos voltajes inducidos pueden provocar que el voltaje absoluto del edificio se eleve a unos cuantos cientos de voltios de diferencia con respecto a un sistema de aterrizaje situado a unas pocas decenas de pies desde el edificio. Estos voltajes son esporádicos y transitorios y pueden alimentar pulsos en la circuitería de las computadoras, interfiriendo con las operaciones deseadas o aún provocando fallas de los componentes.

5.5.4.4 UNIDADES REMOTAS DE COMPUTADORAS: cuando las unidades remotas de computadoras (satélites) o componentes se aterrizan en un electrodo de aterrizaje aislado y

en su propio lugar, lejos del edificio principal, se puede desarrollar un voltaje en el circuito entre los dispositivos semiconductores de los satélites y el computador principal y destruirlos. La Fig. 68 ilustra esto.

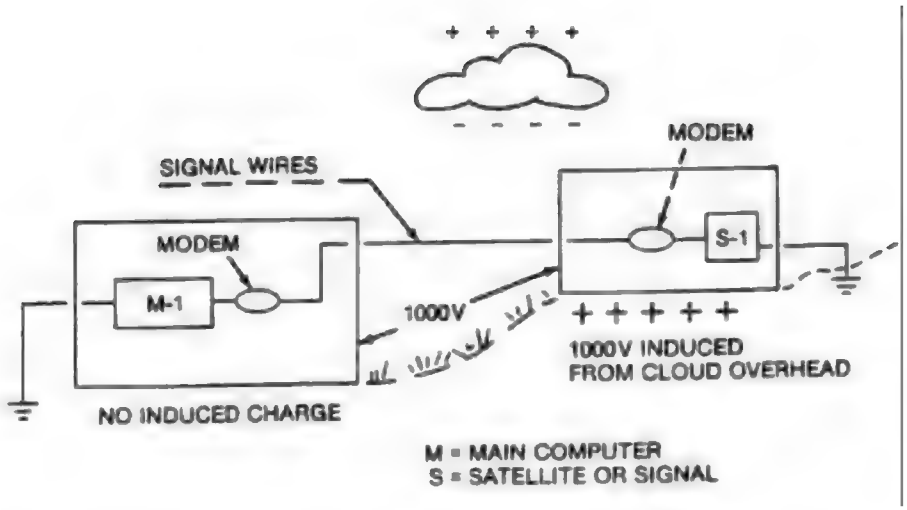


FIGURA 68 Unidad remota de computadora debajo de una nube cargada

Para prevenir este sobrevoltaje se necesita un repetidor aislado que se usa con un sistema telefónico y que se llama "modem" y que hace al alambre de interconexión de la señal equivalente a un circuito telefónico, ("modem" es contracción de MOduladorDEModulador y es la circuitería o "hardware" que conecta el terminal de datos con una línea de comunicación).

5.5.4.5 DIVERGENCIAS CON EL NEC: las secciones 250-5, 26, 51, 54, 57, 58, y 59 demandan que todos los equipos que se sirven desde una fuente de potencia se deben aterrizar o unir al punto de aterrizaje de la fuente. (Además, el neutro de todas las fuentes de potencia se debe aterrizar, con muy pocas excepciones).

Claramente, cuando se usa un electrodo aislado o separado de aterrizaje, para las computadoras, se violan estos requisitos del NEC.

El NEC demanda una trayectoria metálica desde todas las estructuras de los equipos que se sirven, hasta el neutro de la fuente. Si la trayectoria tiene impedancia baja, cualquier falla tendrá suficiente magnitud para operar rápidamente el dispositivo de protección y desenergizar la unidad fallada.

Con electrodos de tierra aislados y separados, una falla en la computadora enviará la corriente de falla a que pase por la resistencia de ambos electrodos aislados y por la tierra de la fuente del edificio, en serie.

Si la resistencia del electrodo aislado de tierra es 20 Ω y la resistencia del edificio es 20 Ω,

una componente de falla de 120 V provocaría una corriente de 120 / 40 = 3 amperios.

Esta cantidad de corriente sería insuficiente para operar cualquier dispositivo de protección de 15 A. La Fig. 69 ilustra esta condición.

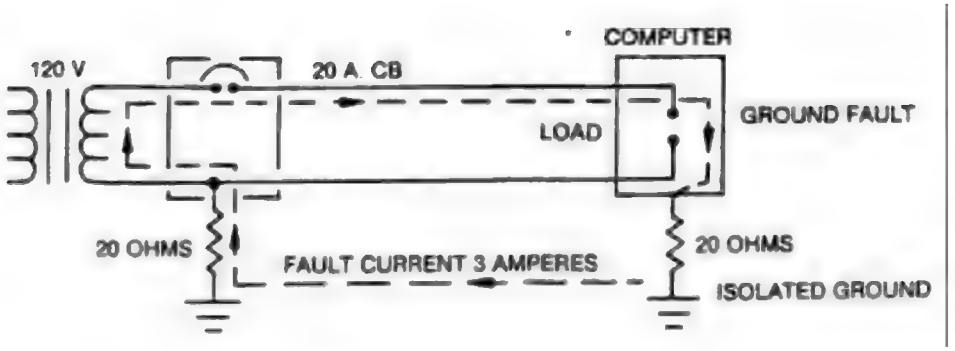


FIGURA 69 Tierra aislada insegura de computadora

20 Ω sería un valor muy bueno de resistencia para una varilla sencilla de tierra en cualquier parte. En una instalación de computadoras en New Jersey, se colocaron tres varillas de tierra separadas, en un suelo en las cercanías del lecho de un río.

Las mediciones dieron los siguientes resultados: 55, 45 y 30 Ω, cada una. Esto se podría considerar típico.

La falla podría permanecer entre la estructura de la computadora y las partes metálicas del edificio adyacente, representando un peligro para el personal. Claramente, esta condición se debe corregir.

5.5.5 SISTEMA DE ATERRIZAJE DE PUNTO SENCILLO: para eliminar los aspectos indeseables de los sistemas anteriores de aterrizaje de computadoras y sistemas electrónicos sensibles similares, se ha desarrollado el Sistema de Aterrizaje de Punto Sencillo y es el método que se recomienda para aterrizar equipo electrónico sensible.

Esto elimina los problemas de "ruido" de los electrodos de aterrizaje de potencia de puntos múltiples aterrizando cualquier sistema de computador a un único punto en el sistema de aterrizaje de potencia.

Cualquier otro computador se debe aterrizar al mismo punto sencillo en el sistema de aterrizaje de potencia, como todos los demás computadores.

También se eliminan los voltajes capacitivos inducidos entre el edificio y el computador, debidos a aterrizajes separados, uniendo el computador y el edificio al mismo electrodo.

La resistencia del acero de un edificio aterrizado efectivamente, como demuestra el trabajo

de R. B. West, es muy baja, del orden de menos de 1 Ω.

Cuando el electrodo de aterrizaje del computador y el electrodo de aterrizaje del sistema de potencia eléctrica se conectan juntos, las elevaciones de voltajes transitorios aplicadas al acero del edificio resultarán en que todo el sistema del computador subirá y bajará con el acero del edificio. No se inducirán voltajes en los circuitos del computador.
5.5.6 ATERRIZAJE RADIAL CENTRAL: se logra conectando juntos los circuitos de aterrizaje de la unidad principal y las unidades satélite de cualquier sistema, con alambres aislados de 600 V. Esto se ilustra en la Fig, 70

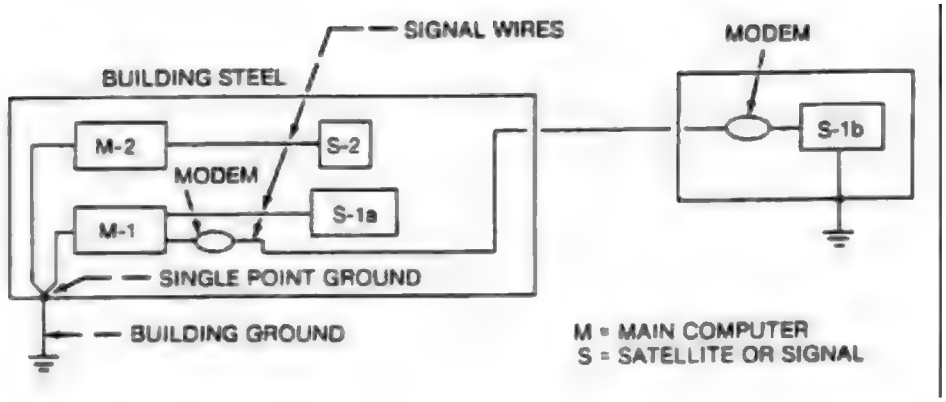


FIGURA 70 Toma de ruido cero desde un aterrizaje de punto sencillo de un sistema de dos computadoras

El elemento de tierra de la unidad principal se conecta, otra vez con alambre aislado, a un punto sencillo de la tierra del sistema de potencia del edificio.

El punto preferido es aquel en que se aterriza el "sistema derivado de potencia" o secundario del transformador que alimenta la computadora.

Pero puede ser cualquier otro punto sencillo del sistema de aterrizaje del edificio o del sistema eléctrico de potencia derivado separadamente.

Los conductores de aterrizaje de los sistemas separados de la unidad principal y satélites se conectan juntos. (Para que quede claro, designémoslo como M_1).

Están aislados de todos los otros sistemas (M_2) y del sistema de tierra de la potencia del edificio, excepto que el terminal de tierra de la unidad principal de cada uno de los sistemas se aterrice con alambre aislado, en un punto del sistema de tierra de la potencia del edificio.

Este punto único (M_1) puede ser el mismo punto (M_2) al que se aterrizan los otros sistemas o cada uno de los sistemas se puede conectar en puntos diferentes.

Si el sistema de computadores satélites está aislado del sistema principal con "modems" adecuados que soporten la diferencia de voltaje entre ellos, el sistema de computadoras satélite se puede aterrizar en su propia tierra separada.

Esto se ilustra en la Fig. 70.

Las computadoras que tienen alambrado de señales hacia afuera del edificio, a otro edificio con fuente de potencia separada se pueden compatibilizar con el NEC usando "modems" que permiten la separación de las conexiones de aterrizaje sin introducir el ruido de puntos múltiples de aterrizaje.

Estos "modems" son los mismos dispositivos que se usan para conexión de las líneas de señales de las computadoras, vía cable telefónico. Cuando hay varias computadoras centralizadas en un lugar o "cuarto de computadoras", se pueden aterrizar todas a un sólo punto, como se ve en la Fig. 71.

Pueden recibir su potencia desde una sola fuente, de preferencia de un transformador de aislamiento local que se puede aterrizar adentro o en las afueras del cuarto.

Entonces, esto puede servir muy bien, como el punto de aterrizaje para todas las computadoras del cuarto.

Si hay interconexiones, las unidades que están interconectadas deben compartir un solo electrodo de aterrizaje de las señales, un solo punto de conexión al acero del edificio, etc.

Cuando hay varios cuartos de computadoras o computadoras localizadas en varios puntos dentro del edificio, y no hay otra conexión entre las computadoras, o entre los cuartos de computadoras, cada uno de esos grupos o unidades individuales se pueden aterrizar al sistema de tierra de la potencia eléctrica (acero del edificio aterrizado efectivamente, etc.) en el lugar que tengan más cerca.

5.5.7 REDES DE AREA LOCAL: los fabricantes de equipo electrónico sensible y de computadoras reconocen el problema de aterrizaje. Con los avances en el diseño interno de las computadoras y el desarrollo de las Redes de Area Local (LANs), las necesidades relacionadas con el aterrizaje desaparecieron.

En muchos sistemas "LAN", la pantalla del alambre de señal no se conecta a la tierra del chasís, pero tienen una tierra común. Cada una de las computadoras se conecta en el receptáculo de potencia eléctrica más cercano.

Estos cambios en el diseño, aparentemente han reducido el problema; sin embargo, queda la posibilidad de voltajes potenciales de pantalla de línea de señal a chasís, durante condiciones severas de falla a tierra.

5.5.8 FIBRAS OPTICAS: en vez del modem en la línea de datos entre edificios (Fig. 70), el aislamiento se puede lograr, usando líneas de fibra óptica, en sustitución de conductores eléctricos. Algunos fabricantes de computadoras dan este aislamiento de enlace óptico con líneas terminales de entrada-salida para este propósito. Es posible que se necesiten "repetidores" o amplificadores para todas las líneas de datos de fibra óptica. Se debe consultar a los especialistas de fibra óptica de las compañías de teléfonos.

Recuerde que hay dos tipos de sistemas de fibra óptica: "línea larga", que las compañías de teléfonos ocupan para transmisión a distancias largas, y "línea corta", que se usan para comunicaciones internas en edificios y para aislamiento de los sistemas eléctricos. Las construcciones son diferentes y sus aplicaciones también.

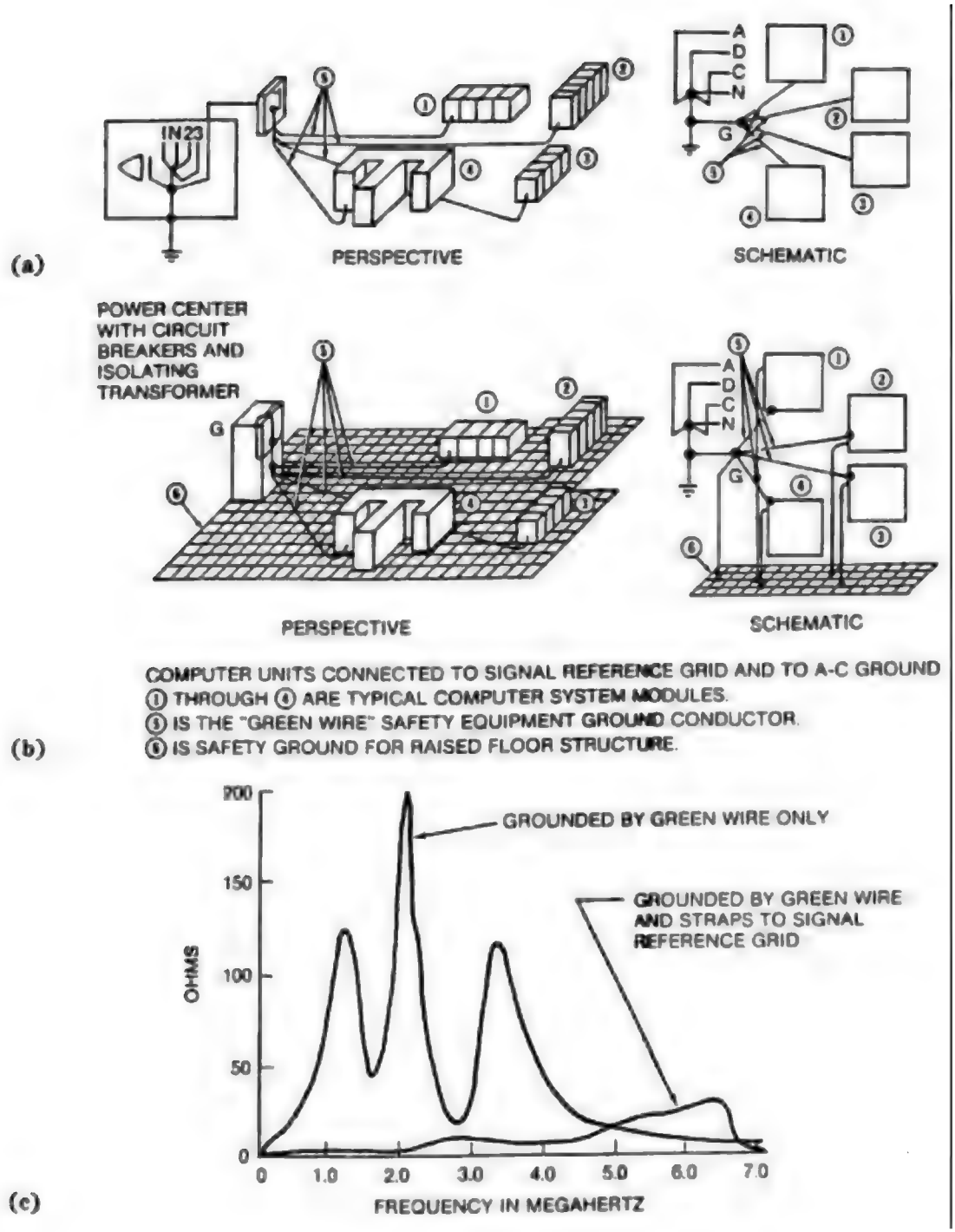


FIGURA 71 Las rejillas de referencia de señal reducen la resonancia:
a) Conductores de computadoras sujetos a resonancia de alta-frecuencia con señales de RF
b) Unidades de computadora conectadas a una tierra de referencia de señales y a la tierra de la fuente de potencia de CA
c) Resonancia de conductores de tierra de equipo de potencia en lugares típicos

5.6 EFECTOS DE RECTIFICADORES INTERNOS EN COMPUTADORAS

Muchas computadoras operan internamente con corriente directa, que se obtiene de señales de 50 ó 60 HZ, con rectificadores y filtros. Los filtros convierten la señal rectificada de CA a una señal pura de CD, ocupan capacitores y reactores o resistores grandes.

Los capacitores drenan las corrientes a través del rectificador (en la línea de CA), sólo cuando el voltaje de salida del rectificador está cerca del voltaje de salida de CD del capacitor de entrada al filtro. Esto es para el período corto que antecede al pico de voltaje, como se muestra en la Fig. 72. Este es un pico de corriente muy cerca de la corriente senoidal de 60 HZ de la fuente de potencia del computador que incrementa su valor rms.

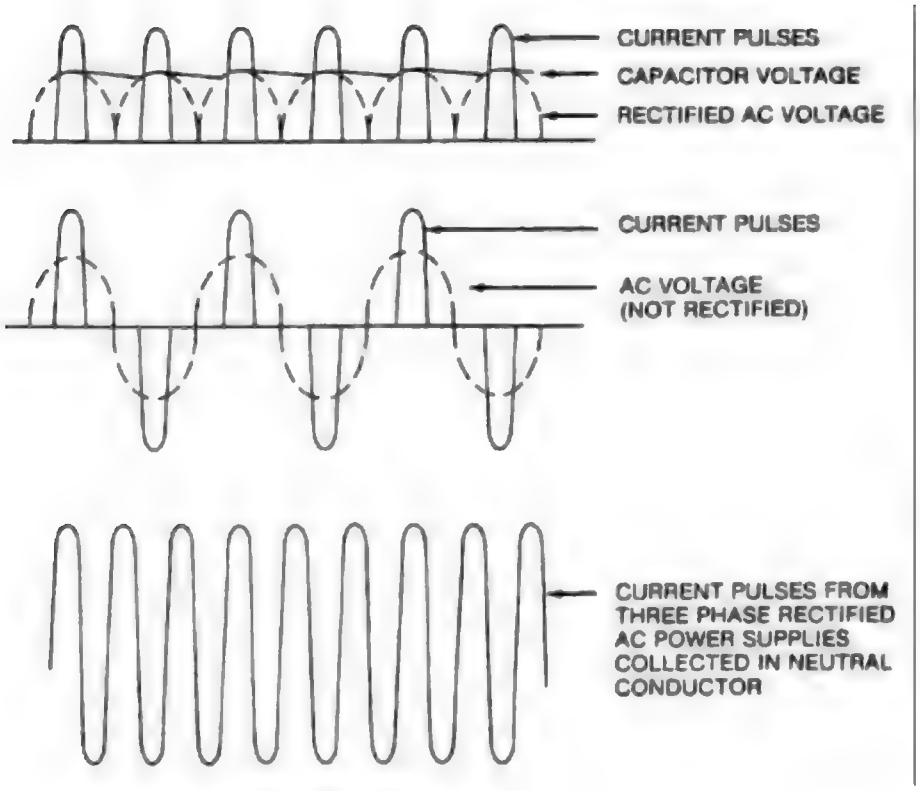


FIGURA 72 Efecto del circuito rectificador sobre la corriente de CA

Los pulsos de corriente en cada una de las fases son muy cercanos a las corrientes senoidales de 50 ó 60 HZ y provocan un incremento desproporcionado en la corriente rms o el efecto de calentamiento equivalente.

Por las componentes de alta frecuencia, el incremento de corriente no se registra en los medidores de 50 ó 60 HZ.

Por lo tanto, generalmente se deben sobredimensionar los conductores de alimentación,

hasta en un tercio más de la corriente que se lee en los medidores de 50 ó 60 HZ, que no las indicarán. Este sobredimensionamiento también se debe aplicar en los tableros y transformadores de alimentación. (Vea Fig. 73).

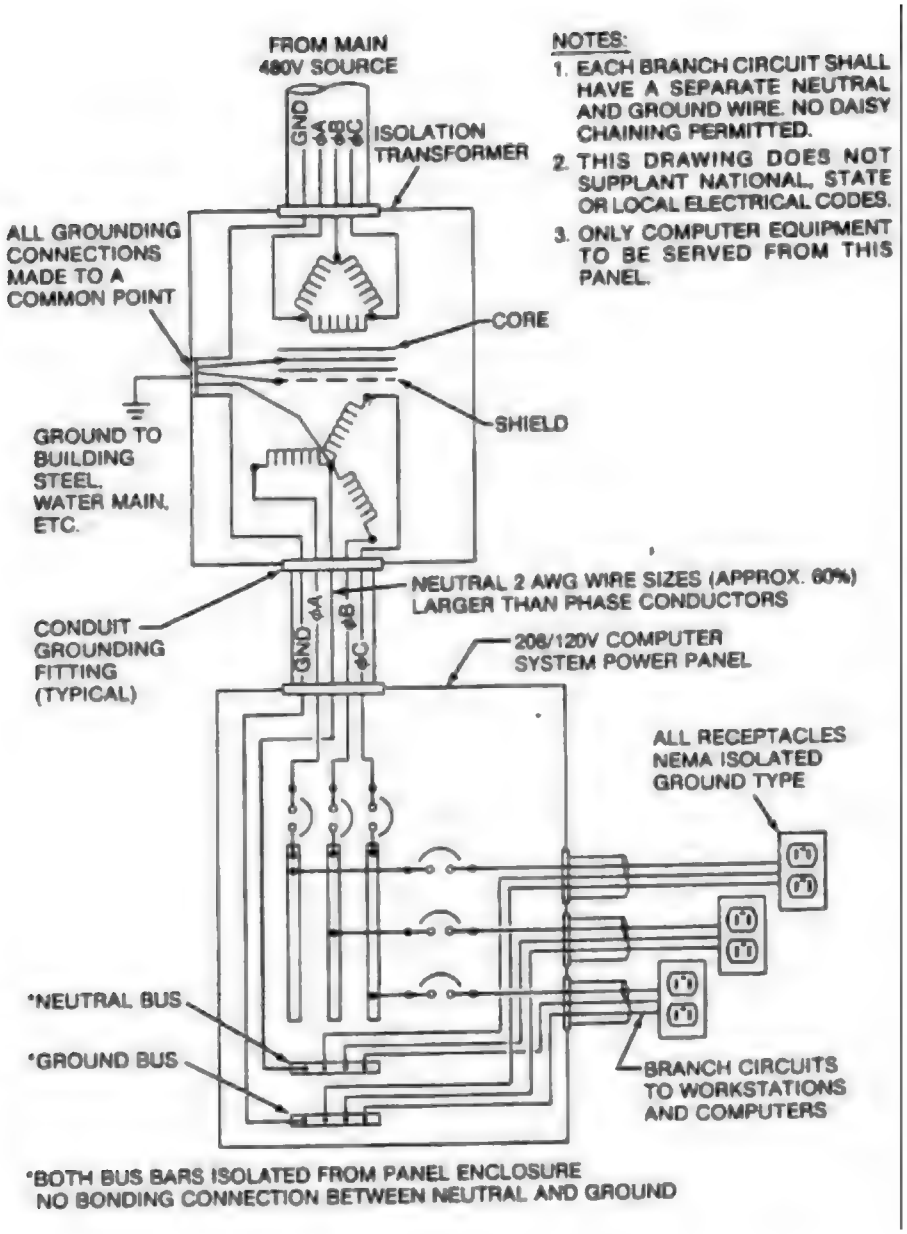

FROM MAIN
480V SOURCE
GND
ISOLATION
TRANSFORMER
NOTES:
1. EACH BRANCH CIRCUIT SHALL HAVE A SEPARATE NEUTRAL AND GROUND WIRE. NO DAISY CHAINING PERMITTED.
2. THIS DRAWING DOES NOT SUPPLANT NATIONAL, STATE OR LOCAL ELECTRICAL CODES.
3. ONLY COMPUTER EQUIPMENT TO BE SERVED FROM THIS PANEL.
ALL GROUNDING CONNECTIONS MADE TO A COMMON POINT
CORE
SHIELD
GROUND TO BUILDING STEEL, WATER MAIN, ETC.
NEUTRAL 2 AWG WIRE SIZES (APPROX. 60%) LARGER THAN PHASE CONDUCTORS
CONDUIT GROUNDING FITTING (TYPICAL)
GND
ØA
ØB
ØC
208/120V COMPUTER SYSTEM POWER PANEL
ALL RECEPTACLES NEMA ISOLATED GROUND TYPE
*NEUTRAL BUS
*GROUND BUS
BRANCH CIRCUITS TO WORKSTATIONS AND COMPUTERS
*BOTH BUS BARS ISOLATED FROM PANEL ENCLOSURE
NO BONDING CONNECTION BETWEEN NEUTRAL AND GROUND

FIGURA 73 Distribución de potencia recomendada - Sistema de computadoras

Esta corriente pulsante es similar a la corriente de carga monofásica desbalanceada. Cuando ocurren, cada uno de los pulsos son monofásicos y no están balanceados con las otras fases, como las corrientes senoidales trifásicas separadas 120º.

Los picos de corriente son suficientemente altos, de tal manera que el efecto acumulado RMS y de calentamiento puede exceder el valor RMS de la corriente de línea.

Por lo tanto, no se debe llevar neutros comunes, cada una de las fases debe llevar su propio neutro.

Es decir que, por lo que hemos señalado, los equipos, conductores y barras entre el transformador y el principio de las cargas monofásicas se deben evaluar por el sobrecalentamiento.

Los sistemas de distribución y aterrizaje ilustrados en la Fig. 74 cumplen con todos los requisitos del NEC y también, mantienen el aislamiento y el rechazo al ruido que necesitan los sistemas de computadoras.

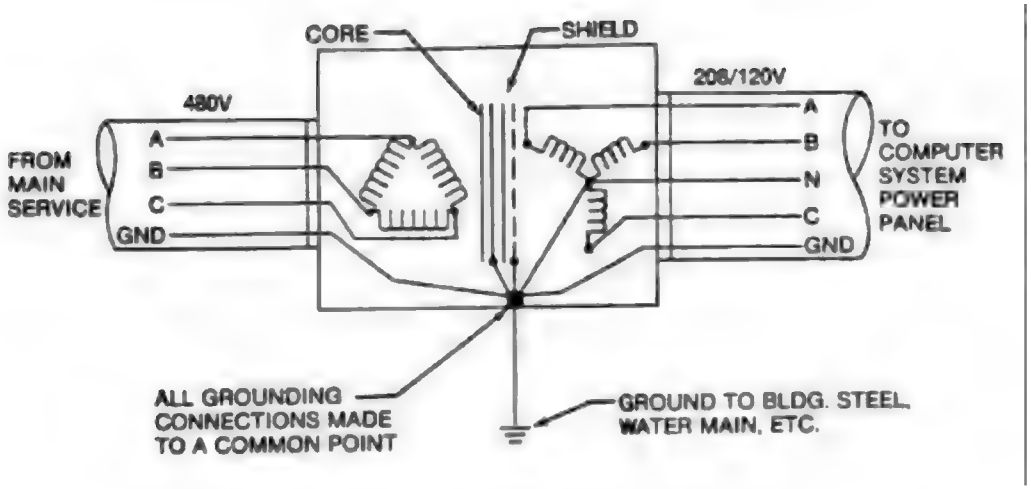


FIGURA 74 Transformador de aislamiento de computadoras

Se recomienda este tipo de instalación para minimizar los numerosos métodos incorrectos de instalaciones con tierras aisladas que violan los requisitos de seguridad del NEC y crean peligros para el personal y los equipos.

5.7 ATERRIZAJE DE PANTALLAS

Cuando se usa ducto rígido (conduit) para conductores de señales, el conduit actúa como pantalla completa. Esta pantalla se ha aterrizado en muchos lugares, sin importar si el conduit se ha conectado al acero del edificio.

Con el uso de las bandejas para cables y otros métodos de conducción de conductores (canaletas), la pantalla total desapareció.

Entonces, cuando no se usa conduit metálico, se debe especificar conductores de señales con pantalla individual y una pantalla total que debe actuar como la pantalla que da el conduit.

Para usos en frecuencia baja, la pantalla total se aterriza en todos los lugares que sea

posible.

Las pantallas individuales se aterrizan, de acuerdo a la frecuencia: en un extremo para frecuencia alta y en muchos puntos para frecuencia baja.

5.7.1 DESCRIPCION / NECESIDADES: La inducción electrostática en alambres que llevan señales de bajo voltaje se elimina instalando pantallas electrostáticas alrededor de los alambres. Estas pantallas pueden ser:

(1) Alambre de cobre trenzado

(2) Hojas metalizadas con un alambre de cobre para drenar

(3) Conduit metálico (si es conduit de acero, también sirve como pantalla magnética)

(4) Otros métodos de apantallamiento

Para que sea efectiva, la pantalla se debe aterrizar. Para señales con frecuencias cercanas a 1 MHZ, es conveniente aterrizar la pantalla sólo en un extremo, preferentemente en el extremo de la fuente de la señal, dejando aislado de tierra el extremo de la carga. Esto es para prevenir que la pantalla actúe como conductor para las diferencias de potencial entre los dos extremos.

Esta diferencia de potencial puede existir entre dos sitios distintos del acero estructural. Cuando hay corriente circulante en la pantalla, el voltaje de esta corriente se inyecta en los voltajes de señales, especialmente cuando el voltaje de señal está entre el conductor encerrado y la pantalla.

Cuando el voltaje de interferencia es de frecuencia baja (60 HZ) y la señal es de frecuencia alta, el extremo aislado de la pantalla se puede proteger con un capacitor de tamaño apropiado. Actuará como impedancia alta para la frecuencia de interferencia, pero será impedancia baja para la frecuencia de la señal.

A medida que la frecuencia de la señal aumenta sobre 1 MHZ, se necesita aterrizar la pantalla en ambos extremos y posiblemente en muchos puntos entre los dos extremos. Es importante que los alambres de tierra sean muy cortos, se pueden conectar al acero del edificio, en vez de ocupar algún circuito de aterrizaje que se encuentre más lejos.

Los terminales de aterrizaje desarrollan una impedancia proporcional a la frecuencia y a la longitud. Un conductor de aterrizaje mayor de 1/20 ó 0.05% de la longitud de onda de la frecuencia de interferencia no servirá apropiadamente su propósito.

La longitud de onda en metros es 300 dividido por la frecuencia en MHZ:

$$\lambda = (300) (10^6) / f$$

En donde:
λ = longitud de onda (metros por ciclo)
f = frecuencia (ciclos por segundo)

(300)(10^6) = constante (velocidad de una onda electromagnética en el espacio libre)

La velocidad de una onda electromagnética en el vacío es 186,000 millas (300,000 Km) por segundo. La velocidad es menor en un conductor. Una onda de voltaje viajará, aproximadamente, 98 pies (29.87 m) en el espacio libre, durante un ciclo de un pulso de 10 MHZ.
En un conductor de aterrizaje, la onda puede viajar sólo 88 pies (26.82 m) en 1/10 de μ seg. Si el conductor tiene una longitud de 88 pies, la onda se reflejará y regresará al principio, al mismo tiempo que comienza un pulso nuevo.

Ocurrirá la resonancia y las oscilaciones de la línea se amplificarán enormemente.

El pico ocurrirá a 1/4 de longitud de onda, o en el ejemplo del conductor de 88 pies de longitud, a una distancia de 22 pies.

La buena práctica de la ingeniería establece que cualquier conductor más largo que 1/20 de una longitud de onda no es confiable para que ecualize los voltajes entre sus extremos.

Así, para una frecuencia de interferencia de 10 MHZ, la longitud no se puede exceder 1/20 ó 0.05%, en 1/10 de μ seg.

[(0.3048 pies/m) (0.05%) (300) (10^6)] / [(10) (10^6) = 4.5 pies (1.37 m)]

Las frecuencias de interferencia más grandes necesitarán longitudes de alambre de aterrizaje, proporcionalmente más cortas (inversamente), o las pantallas perderán efectividad.

5.7.2 SOBREVOLTAJES EN PUNTOS ABIERTOS: En el extremo no aterrizado de las pantallas se puede desarrollar algún voltaje entre la pantalla y tierra.

La pantalla se debe aislar para prevenir exposiciones peligrosas para el personal. Además, la pantalla se debe aislar en toda su longitud para prevenir muchos aterrizajes en puntos que pueden estar a diferentes voltajes de la pantalla y que podrían inyectar voltajes en ella.

En el extremo de la pantalla, se debe quitar la cubierta para llegar a la pantalla e interrumpir su continuidad. El extremo se debe aislar para prevenir choques al personal.

Si la pantalla continúa, más allá de este punto, ya sea pantalla flexible de cobre trenzado o tubo, se debe traslapar al extremo aislado de la pantalla de señal, empalmar con la pantalla que sigue y aterrizar en el extremo de la carga al terminal de aterrizaje.

5.8 INTERFERENCIAS DESDE FRECUENCIAS DE RADIO

Los problemas de resonancia a frecuencias altas debido a la longitud del conductor de aterrizaje desde las unidades de computadoras hasta el punto de aterrizaje se pueden eliminar con una rejilla de aterrizaje en el piso del cuarto de computadoras.

Para cada grupo de equipos de computadoras, el efecto de resonancia se evitará con una

malla en rejilla de alambres de cobre, en el piso, con alambres de empalme desde cada unidad del equipo de computadoras a la rejilla y otro empalme desde la rejilla hasta el punto de aterrizaje del cuarto.

La Fig. 71 ilustra este principio, mostrando un grupo sin rejilla (a) y el mismo grupo con la rejilla (b). La comparación del comportamiento se presenta en (c).

5.9 HISTORIAS DE CASOS

5.9.1 CORRIENTE A TIERRA EN UN EDIFICIO DE LAS OFICINAS CENTRALES DE UNA CORPORACION

Un edificio de oficinas tiene un transformador de alumbrado de 1,500 KVA, en el sótano. El cuarto de computadoras está a la par del cuarto del transformador. El sistema de 120/208 voltios tenía muchas conexiones del neutro a tierra, que ofrecían trayectorias paralelas para la corriente de retorno por el acero del edificio, tuberías, etc.

La computadora funcionaba mal, cada vez que se conectaba o desconectaba una carga grande. La carga total del transformador era de 1,200 amperios, aproximadamente. La corriente de retorno en el neutro, desde tierra oscilaba de 40 a 60 amperios.

Todas las conexiones de las computadoras a tierra se juntaban en un único punto de conexión. A pesar de las muchas fallas de neutro a tierra, principalmente en las lámparas de iluminación, nada se hizo para corregir esta situación, por los costos.

Sin embargo, toda la construcción nueva se inspeccionó para localizar fallas de neutro a tierra y se responsabilizó al contratista para encontrar y hacer las correcciones.
En la construcción nueva, se encontró que un tablero típico de alumbrado de 42 polos tenía el 20% de los circuitos derivados, fallados, con fallas de neutro a tierra.

5.9.2 CONEXION A TIERRA DE UN EDIFICIO DE OFICINAS DE UNA CORPORACION. Varias computadoras grandes del complejo de oficinas de una corporación grande, situadas en el 10º piso, se aterrizaron, cada una de ellas, con un conductor de aterrizaje en el cable de la fuente de potencia, a la tierra del transformador de alimentación, al acero estructural.

El cable de suministro de potencia de cada computadora era del tipo con forro de plástico, de 10 (3.05 metros) pies de longitud, terminando en un enchufe multiconductor, con el conductor de tierra agregado a la cápsula metálica del enchufe. El usuario compraba el receptáculo y el cable hasta la fuente. Este cable no tenía envoltura, pero tenía el conductor de tierra agregado a su armadura metálica.

Se encontró que separando la armadura del cable, de contacto con cualquier armadura de otros cables o soportes metálicos (aterrizados) para el piso elevado, se redujo el nivel de ruido continuo en un 90%. Consecuentemente, se le puso envoltura de aislamiento a los cables de potencia para eliminar la interferencia de ruido entre las tierras separadas de los conductores de aterrizaje. Esto, demostró también, que el ruido se generaba en cada una de las computadoras y que la conexión con otras computadoras podría introducir ruido en todos esos sistemas.

5.9.3 PLANTA DE PRODUCION DE LA ARMADA DE USA. Una computadora en un edificio de control pequeño, servía a unas instalaciones de producción de las cercanías.

Esta computadora tenía una tierra aislada de 28 Ω de resistencia a tierra y una resistencia de 0.7 Ω separada del sistema de la tierra de potencia del edificio.

La fuente de potencia de la computadora provenía del sistema de potencia de la planta, estabilizada con transformadores estáticos de regulación. En una tormenta eléctrica, el poste que sostenía el transformador de servicio al edificio de control, pero a 300 pies (91.44 m) de distancia del edificio, recibió una descarga de rayo.

La computadora no estaba en operación y los interruptores principales de potencia estaban abiertos. Pero la computadora tuvo fallas de un tercio de los dispositivos semiconductores de su sistema.

Aparentemente, el sobrevoltaje no entró a la computadora, a través del sistema de potencia. El pararrayos en la entrada al edificio, de las líneas normales de potencia, elevó sustancialmente el voltaje de la estructura del edificio. La computadora se mantuvo, por su tierra aislada, a un voltaje más bajo que el del edificio. La capacitancia entre el edificio y la computadora permitió introducir voltaje entre los dos, provocando sobrevoltajes sobre los componentes y causando la falla de muchos de ellos.

Consecuentemente, se interconectó el conductor de tierra del computador con la tierra del sistema de potencia del edificio. Ya no hay funcionamientos anormales debidos a descargas eléctricas.

Un segundo grupo de producción, en el mismo sitio, se aterrizó en un punto único, con el electrodo de aterrizaje del edificio. Había diez computadoras en este grupo, interconectadas con cuatro edificios remotos de producción. Todas las terminales remotas se aterrizaron a las computadoras del control central, cada una de ellas conectada a una barra de tierra de servicio pesado. Desde ese punto, se llevó un conductor grande, a la malla de aterrizaje, alrededor del edificio. Esta malla tenía un electrodo de aterrizaje de menos de 1 Ω de resistencia.

A pesar de que el área donde se encontraba el edificio tenía incidencia alta de descargas, se logró una operación libre de disturbios.

Los componentes de computadora en los edificios remotos de producción se aislaron de los sistemas de aterrizaje del edificio, de esos edificios.

5.9.4 SISTEMA DE COMPUTADORAS DE UN RESTAURANTE. Un sistema de computadoras de "punto de venta" formado por una unidad central de procesamiento (CPU) con disco duro y siete dispositivos remotos (cinco terminales y dos impresoras) se instalaron en un restaurante.

Las tierras aisladas de los circuitos derivados se conectaron a barras de tierra, aislada, y tuberías de agua, aisladas. El sistema funcionaba mal, todos los días.

Se instalaron transformadores aislados y blindados en el CPU y en todos los dispositivos remotos.

Las tierras aisladas se conectaron a los terminales de tierra de los equipos en los subtableros y se quitaron todas las conexiones a las barras de tierra y a las tuberías de agua.

Después de estos cambios, el sistema operó satisfactoriamente por más de dos años.

5.9.5 EDIFICIO ELEVADO DE OFICINAS. Un sistema de computadoras formado con 2 CPU, disco duro, cinta magnética y varios periféricos se instaló en un piso alto de un edificio de oficinas elevado. La fuente de potencia para el sistema era un transformador de 112.5 KVA localizado en el cuarto de electricidad en ese mismo piso.

La tierra aislada del tablero del cuarto de computadoras se instaló con los conductores alimentadores regresando al cuarto de electricidad, donde terminaban en el cobre de 500 MCM del edificio.

Ambos CPU sufrieron muchas incidencias de suspensiones, después de las cuales se debía apagar el sistema y volver a arrancar. Esto provocaba la pérdida de todos los datos.

Se removió la conexión a la tierra de 500 MCM del edificio y la conexión de aterrizaje se hizo, con los conductores alimentadores, al terminal X_0 del neutro-tierra del transformador de 112.5 KVA.

Después de este cambio, el sistema operó por varios meses sin un incidente simple de desconexión del CPU.

5.9.6 EDIFICIOS SEPARADOS / TIERRA UNICA. Cuatro estructuras separadas, pero cercanas eran los edificios de control para una serie de procesos químicos. Cada edificio albergaba una computadora para control de procesos. Había algunas interconexiones entre los circuitos de datos de las computadoras y los edificios adyacentes. Cada una de las cuatro computadoras se aterrizó, separadamente, al sistema de aterrizaje (de potencia) del acero estructural de su edificio. La operación del sistema de computadoras era completamente errática.

Uno de los ingenieros de la planta sugirió que los sistemas de aterrizaje de las cuatro computadoras se conectaran juntos y se aterrizaran en un sólo punto: en uno de los dos edificios del centro. Las operaciones erráticas se acabaron. El NEC se violó, porque había un sistema de retorno metálico de falla a tierra, por toda la planta, por el sistema de conexión entre edificios, pero, con impedancia alta.

La interconexión de las computadoras convertía los cuatro sistemas en uno sólo, por lo que el aterrizaje en cuatro puntos inducía corrientes a tierra en las mallas.

También, en esta planta, como en todas las otras de la compañía, todas las estructuras de los edificios se interconectaron a un sólo sistema de tierra, convirtiéndolas en una combinación de acero estructural único.

Entonces, la conexión a las cuatro era lo mismo que aterrizar en cuatro puntos de un mismo edificio. Estos aterrizajes comunes pueden resultar con un sistema metálico de agua, pantallas de los alambres de tierra de los cables eléctricos, tuberías de proceso, etc. Estos pueden inyectar problemas en muchos esquemas de aterrizaje de sistemas de computadoras.